Die anfängliche Suszeptibilität von Nickel in Abhängigkeit von der Temperatur und die Abhängigkeit des Umwandlungspunktes von der Feldstärke.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophischen Fakultät

(mathematisch-naturwissenschaftliche Sektion)

der

UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

Demetrius M. Radovanović

dipl. Maschineningenieur aus Zürich

Begutachtet von den Herren

Prof. Dr. *A. Kleiner*

Prof. Dr. *P. Weiss*

Zürich

Druck von Zürcher & Furrer

1911

Die anfängliche Suszeptibilität von Nickel in Abhängigkeit von der Temperatur und die Abhängigkeit des Umwandlungspunktes von der Feldstärke.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

Philosophischen Fakultät

(mathematisch-naturwissenschaftliche Sektion)

der

UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

Demetrius M. Radovanović

dipl. Maschineningenieur aus Zürich

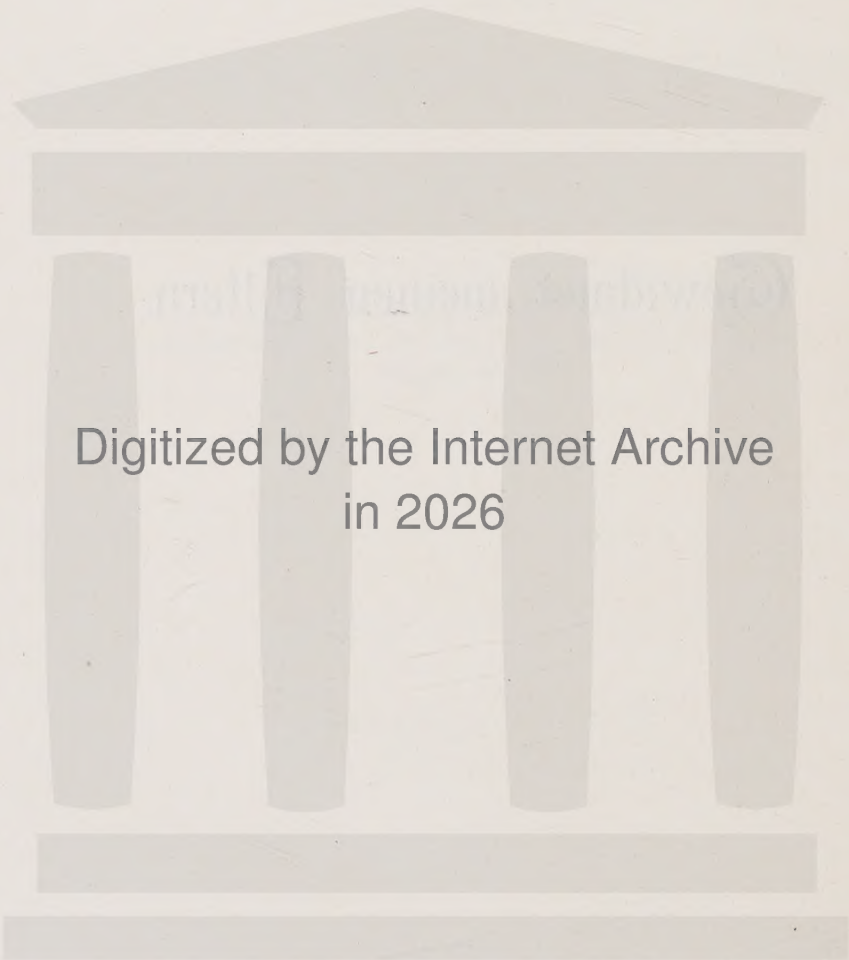
ACAD. LUGD BAT. BIBL.

Begutachtet von den Herren
Prof. Dr. *A. Kleiner*
Prof. Dr. *P. Weiss*

Zürich
Druck von Zürcher & Furrer
1911

Abdruck aus
„Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich“
Jahrgang 55, 1910.

Gewidmet meinen Eltern.


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507212_0045

Einleitung.

Der Einfluss der Temperatur auf die magnetischen Eigenschaften von ferromagnetischen Körpern war schon lange Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, und es war längst bekannt, dass Nickel, Eisen und Kobalt bei gewissen Temperaturen die „magnetischen Eigenschaften" verloren, wie man sich ausdrückte.

Hopkinson[1]) fand für Gusseisen, einem schwachen, magnetischen Felde ausgesetzt, ein Anwachsen der Suszeptibilität beim Erhitzen bis zu 775° C. und ein rapides Abnehmen, wenn die Temperatur weiter erhöht wurde. Bei Anwendung eines starken Feldes zeigte sich der Übergang vom ferromagnetischen zum paramagnetischen Zustand weniger plötzlich, doch gleichfalls vollständig und im Grossen und Ganzen bei der gleichen Temperatur. Er nannte diese Temperatur die kritische Temperatur, die bei den verschiedenen Eisensorten zwischen 690° und 870° C. gefunden wurde. Für unreines Nickel[2]) war die kritische Temperatur 310° C. und stets gleich für die verschiedenen Feldstärken $H = 2{,}5$ bis $H = 50$ C. G. S.

Die Experimente von Rowland[3]), Baur[4]) und Hopkinson[1]) bezogen sich auf die Untersuchung der Magnetisierungs- oder Induktions-Kurve in Funktion der Feldstärke H bei verschiedenen, während der Versuche konstant gehaltenen Temperaturen. Sie fanden im allgemeinen, dass die Suszeptibilität bei schwachen Feldern mit zunehmender Temperatur steigt, in starken Feldern jedoch mit steigender Temperatur abnimmt.

---

[1]) Hopkinson: Magnetic and other Physical Properties of Iron at a high Temp.; Phil. Trans. 1889 A, p. 443.

[2]) Hopkinson: Properties of an impure Nickel. Proc. Roy. Soc. Vol. XLIV, 1888, p. 317. — S. auch du Bois: Phil. Mag. 1890, March.

[3]) Rowland: Phil. Mag. 1874, Nov.

[4]) C. Baur: Exp. Untersuchung über die Natur der Magnetisierungsfunktion. Wied. Ann. Vol. XI, 1880, S. 399.

Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur-Variation bei konstant gehaltener Feldstärke sind zuerst von Wiedemann [1]) ausgeführt worden, in denen er zeigte, dass der erste Einfluss einer jeglichen Temperaturänderung auf den Magnetismus des Eisens nicht reversibel ist und von der Vorgeschichte des zu untersuchenden Stückes abhängt, dass jedoch zuletzt der Vorgang umkehrbar wird, wenn die abwechselnde Erwärmung und Abkühlung genug oft wiederholt wurde.

Das Auftreten von Hysteresis der Magnetisierung infolge von Temperaturänderungen in der Nähe des kritischen Punktes (= kritische Temperatur, s. o.) ergaben auch die Versuche von Osmond [2]) mit hartem Stahl und von Hopkinson [3]) mit Eisennickel-Legierungen, so dass sich eigentlich zwei kritische Punkte zeigten, einer beim Erwärmen, der andere beim Abkühlen. Aus diesen Untersuchungen wurde gefolgert, dass andere Metalle, ausser Nickel, Eisen und Kobalt, nur deshalb unmagnetisch sind, weil die anwendbaren Temperaturen oberhalb des kritischen Punktes liegen und dass sie vielleicht magnetisch würden, wenn die Temperatur nur hinreichend erniedrigt werden könnte. [4])

Es seien noch die Untersuchungen von C. Baur [5]) und Lord Rayleigh [6]) bei gewöhnlicher Temperatur in schwachen Feldern erwähnt, die einen parabolischen Verlauf der Magnetisierungs- und der Induktions-Kurve in Funktion der Feldstärke H zeigen; die Suszeptibilität k und die Permeabilität μ verlaufen somit in diesem Bereich geradlinig und nehmen einen endlichen Wert für $H = 0$ an. In sehr schwachen Feldern von 0,04 bis 0,00004 C. G. S. ergaben für hartes Eisen die Versuche von Lord Rayleigh einen geradlinigen Verlauf der Kurve $I = f(H)$; μ und k sind somit konstant, und er sagt: „In view of this, neither theory nor observation give us any reason for thinking that the proportionality would fail for still smaller forces".

---

[1]) Wiedemann: Galvanismus. II, § 522. — S. auch Ewing: Phil. Trans. 1885, p. 633.

[2]) Osmond: Transformations du fer et du carbone. Mém. de l'Artillerie de la Marine, 1888.

[3]) Hopkinson: Proc. Roy. Soc. Dec. 1889, Jan. 1890, May 1890. — S. auch H. F. Newall: Phil. Mag. June 1883. — F. T. Tronton: Rep. Brit. Assoc. 1889, p. 517. — F. T. Tronton: Proc. Roy. Dublin Soc. 1886.

[4]) F. Hegg: Thèse, Zurich 1910. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 1910, t. XXVIII.

[5]) C. Baur: Inaugural-Dissertation, Zürich 1879. — C. Baur: Wied. Ann. XI. 1880, S. 399.

[6]) Lord Rayleigh: Phil. Mag. 1887, March, p. 225—245. — S. auch R. Gans: Ann. der Physik 1908, 27, S. 1. — R. Gans: Ann. der Physik 1909, 29, S. 301. — R. Gans: Einführung in die Theorie des Magnetismus. Leipzig 1908. — Dubois & Taylor: Elektrotechn. Zeitschrift 1896, S. 543.

Im Feldbereich von 0,04 bis 1,2 C. G. S. dagegen fand er für das gleiche Eisen den oben erwähnten parabolischen Verlauf von $I = f(H)$.

Tomlinson[1]) untersuchte den Einfluss der Temperatur auf die anfängliche Permeabilität c und auf die anfängliche Neigung d der Permeabilitätskurve in der Region, in welcher die Relation von der Induktion B zu der Feldstärke H durch die parobolische Form

$$B = c\,H + d\,H^2$$

ausgedrückt wird, und fand, dass sowohl c als d zunahmen, wenn die Temperatur von 0° auf 100° C. erhöht wurde.

Ausführliche Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf die Magnetisierungsgrössen stammen noch von P. Curie[2]) und in neuester Zeit experimentell und theoretisch zugleich von P. Weiss[3]).

Es sei die Stelle aus „Molekulares Feld und Ferromagnetismus“[4]), welche den Anlass zur vorliegenden Arbeit gab, zitiert:

„Der Koeffizient der ersten Potenz von H (im Ausdruck für die „resultierende Intensität der Magnetisierung J) bedeutet die anfäng„liche Suszeptibilität, von der Lord Rayleigh[5]) gezeigt hat, dass „sie in allen kleinen reversiblen Anderungen der Intensität der Mag„netisierung auftritt, sogar wenn die Magnetisierung einen grösseren „Bruchteil der Sättigungsintensität erreicht. Die Theorie erklärt also „diese Konstanz der reversiblen Suszeptibilität. Aber sie gestattet „eine leicht kontrollierbare Konsequenz hinzuzufügen. Diese anfäng„liche Suszeptibilität kann geschrieben werden:

$$k_0 = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{N_1 - N_2} + \frac{1}{N_1 - N_3}\right)$$

„[worin N_1, N_2, N_3 die Hauptmagnetisierungsfaktoren für die drei „aufeinander senkrechten Symmetrieachsen des Kristalles bedeuten]. „Sie ist also von der Temperatur unabhängig, wenn die Koeffizienten „N_1, N_2, N_3 selbst von der Temperatur unabhängig sind, wie wir es „bis jetzt angenommen haben. Die Versuche über die Änderung der „Suszeptibilität mit der Temperatur[6]) in den schwachen Feldern „scheinen mit dieser Konsequenz der Theorie vereinbar zu sein. Sie „geben meist eine schwache Zunahme der Suszeptibilität mit der „Temperatur. . . . . Die Schwierigkeit der Deutung dieses und ähn-

[1]) Tomlinson: Proc. Roy. Soc. 1889, Dec. 5. — S. auch Ewing: Induction in Iron. 3th ed. London, Ch. VI, p. 124—135.

[2]) P. Curie: Ann. Chim. Phys. 1895, t. V, p. 289. — P. Curie: Oeuvres, publ. par la Soc. franç. de Phys. p. 232—334.

[3]) P. Weiss: L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. J. de phys. 1907, 4e sér., t. 6, p. 661.

[4]) P. Weiss: Phys. Zeitschrift 1908, S. 358—367.

[5]) Lord Rayleigh: loc. cit.

[6]) Ewing: loc. cit., p. 166.

„licher Experimente rührt daher, dass bei höheren Temperaturen das „Bereich der reversiblen Erscheinung sehr eng wird, wie an gewissen „Kurven von Hopkinson[1]) ersichtlich. Neue Versuche mit genauer „Bestimmung dieses Bereiches bei höheren Temperaturen sind not-„wendig."

Vorliegende Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Professor Dr. P. Weiss, dem ich an dieser Stelle meinen besten Dank für seine wertvollen belehrenden Ratschläge und seine wohlwollende aufmunternde Hilfe abstatte, im physikalischen Laboratorium der eidg. polytechnischen Schule in Zürich in den Jahren 1908—1910 ausgeführt.

A. DIE ANFÄNGLICHE SUSZEPTIBILITÄT VON NICKEL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR.

I. Versuchsmittel.

1. Methode.

Zur Bestimmung der Suszeptibilität des Nickels wurde nach Rowland das zu untersuchende Metall in Ringform[2]) gebracht und mit einer Lage von spiralförmigen Windungen für den primären und einer zweiten für den sekundären Stromkreis bewickelt.

Da der grösste Teil der Arbeit auf der ballistischen Methode[3]) beruht, so sei dieselbe hier kurz zusammengefasst.

Ein durch die primäre Bewicklung gesandter Strom i in absoluten Einheiten erzeugt im Innern des Nickels eine magnetisierende Kraft

$$H = \frac{4\pi N_1}{l} \cdot i = \frac{2 N_1}{r} \cdot i,$$

worin N_1 die Windungszahl der Primärbewicklung und l die mittlere Länge der Kraftlinien (der mittlere Umfang $l = 2\pi r$ des Ringes) in cm bedeuten. Da jedoch die Feldstärke vom inneren Umfange des Ringes nach dem äussern zu in Form einer Hyperbel abnimmt, so muss die mittlere magnetisierende Kraft H_m aus der Gesamtzahl der durch den Querschnitt des Nickelringes gehenden Kraftlinien berechnet werden.[4]) Diese ist

$$z = 2 N_1 i h \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2 N_1 i h \log n \left(\frac{r_2}{r_1}\right),$$

[1]) Ewing: loc. cit., p. 174, Fig. 82.

[2]) Rowland: Magnetisation of an Iron Ring. Phil. Mag. Vol. XLVI, 1873, p. 151.

[3]) Lord Kelvin: Phil. Trans. Vol. CLXVI, p. 693. — Ewing: Magn. Induction in Iron. London, 3th ed., Ch. III and IV.

[4]) Obige Gleichung für H gilt nur für solche Ringbreiten, bei welchen das Hyperbelstück innerhalb der Ringbreite als Gerade angesehen werden kann.

worin h die Höhe des Nickelringes bedeutet. Die Division obiger Gleichung durch den Querschnitt des Ringes $q = h\,(r_2 - r_1)$ ergibt die mittlere magnetisierende Kraft

$$H_m = \frac{2\,N_1\,i}{r_2 - r_1} \cdot \operatorname{logn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \qquad (1)$$

welche in der Entfernung

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\operatorname{logn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

vom Mittelpunkt des Ringes wirkt.

Ändert sich nun i um $d\,i$, so wächst die magnetisierende Kraft H_m um $d\,H_m$, und in der sekundären Bewicklung wird dadurch ein Induktionsstrom erregt, der, durch ein Spiegelgalvanometer gesandt, einen Ausschlag hervorruft, proportional der hindurchgegangenen elektrischen Menge. Bedeutet B die Induktion des Nickels, q dessen Querschnitt und N_2 die Anzahl der sekundären Windungen, so ist die Gesamtzahl der Kraftlinien, die für den sekundären Stromkreis in Betracht kommt:

$$z_s = B\,q\,N_2$$

und die bei Änderung von i um $d\,i$ in demselben erzeugte elektromotorische Kraft

$$e = -\frac{d\,z_s}{d\,t} = -\,q\,N_2\,\frac{d\,B}{d\,t}.$$

Durch Kommutieren des primären Stromes wird auch das Feld im Ringe umgekehrt, d. h. es geht von einem bestimmten Werte zum gleich grossen entgegengesetzten über; die Änderung der Induktion B ist somit $2\,B$ und es wird

$$\int e\,d\,t = -\,2\,q\,N_2\,B$$

und die elektrische Menge

$$m = \frac{\int e\,d\,t}{w} = -\,\frac{2\,q}{w}\,N_2\,B,$$

wenn w der Widerstand des sekundären Stromkreises ist.

Die Selbstinduktion entfällt bei der Integration.

Da die elektrische Menge m proportional dem Ausschlage x des Galvanometers ist, so kann auch gesetzt werden

$$m = C\,x,$$

worin C die Galvanometerkonstante bedeutet. Aus den beiden letzten Gleichungen folgt

$$B = -\,\frac{C\,w}{2\,q\,N_2} \cdot x. \qquad (2)$$

Die Magnetisierungs-Intensität ist nun

$$I = \frac{B - H}{4\pi} \tag{3}$$

und die Suszeptibilität

$$k = \frac{I}{H} \cdot \tag{4}$$

Es handelt sich noch darum, die Konstante C zu bestimmen, respektive zu eliminieren, worauf später zurückgekommen werden wird. (Siehe Seite 20).

2. Vorversuche zur Ermittelung der Ringgrösse.

Um annähernd eine bestimmte, durch die Empfindlichkeit des Galvanometers gegebene Genauigkeit der späteren Versuche zu erhalten, wurde die Grösse des Nickelringes nach vorangegangenen Untersuchungen mit Eisenringen ermittelt.

Diese Voruntersuchungen wurden bei gewöhnlicher Temperatur und mit den gleichen kleinen Feldstärken vorgenommen, die auch später zur Anwendung kommen sollten. Die dabei gefundenen Suszeptibilitätswerte wurden in Funktion des Feldes H aufgetragen, zu einer Kurve vereinigt und der Schnitt dieser Kurve mit der Achse $H = 0$ durch Extrapolation bestimmt. Die so ermittelte Abszisse gibt den Wert der „anfänglichen Suszeptibilität" des Metalls für gewöhnliche Temperatur an.[1])

Wird bei Eisen und Nickel die gleiche Zahl Ampèrewindungen auf den Centimeter des mittleren Umfanges vorgesehen, so hängt unter obigen Voraussetzungen und sonst gleichen Umständen die Grösse des Galvanometerausschlages noch von der anfänglichen Suszeptibilität des Metalls, vom Querschnitt des Ringes und von der Anzahl der sekundären Windungen ab, was aus den Gleichungen (1) u. (2) (Seite 9) zu ersehen ist.

Die anfängliche Suszeptibilität des zu untersuchenden Nickels war nicht bekannt. Einigen Werken[2]) wurden aber die anfänglichen Suszeptibilitäten verschiedener Nickelsorten entnommen und daraus ein Mittelwert von $a \backsim 5{,}5$ C. G. S. berechnet; einige Angaben konnten auch aus früheren Versuchen im Laboratorium selbst erhalten werden.

Bei den Vorversuchen wurden zwei Ringe verwendet. Der eine aus weichem Eisen hatte bei 14,2 cm mittlerem Durchmesser 2,35 cm² Querschnitt, der andere aus weichem Stahl bei 14,3 cm mittlerem Durchmesser einen Querschnitt von 2,46 cm². Die anfängliche Sus-

[1]) Lord Rayleigh: Magnetisme in weak fields. Phil. Mag. 1887, March. — Ewing: Magn. Ind. in Iron, 3th ed., Ch. VI.

[2]) Rowland: Magnetisation of an Nickel Ring. Phil. Mag. 1874, Nov.

zeptibilität bei gewöhnlicher Temperatur war bei ersterem 4,56 absolute Einheiten, bei letzterem 13,0.

Unter Annahme von Galvanometerausschlägen der gleichen Grössenordnung für die Vor- und die Hauptversuche blieben daher zwei Variable zu ermitteln: Der Querschnitt des zu untersuchenden Nickelringes und die Anzahl der sekundären Windungen.

Vor der Bestimmung der Ringdimensionen wurde noch Folgendes in Erwägung gezogen. Die Genauigkeit der Resultate steht in direktem Verhältnis zum Ringquerschnitt. Mit einem somit wünschenswerten grösseren Ringvolumen wächst aber auch die Grösse des Ofens und damit weiter die Schwierigkeit, bei diesem die Temperatur in allen Teilen konstant zu erhalten. Es war daher geboten, mit der Ofengrösse nicht zu weit zu gehen.

Ein Ausgangspunkt war im inneren Durchmesser des Ringes gegeben, der nicht nur für die primären und sekundären Windungen mit ihren Isolationen, sondern auch für das achsial einzuführende Platinwiderstandsthermometer genügend Platz bieten musste. Aus der Annahme von ca. 150 Windungen im Ganzen folgte ein innerer Ringdurchmesser von ca. 36 mm. Unter der weiteren Annahme von ca. 90 sekundären Windungen wurde dann der Ringquerschnitt mit $\sim$ 13,5 cm^2 berechnet und der Ring behufs Erzielung einer möglichst kubischen Form mit einem äusseren Durchmesser von $\sim$ 76 mm und einer Höhe von $\sim$ 70 mm ausgeführt.

Es konnte selbstredend nur von einer beiläufigen Rechnung die Rede sein; denn, abgesehen von der unbekannten anfänglichen Suszeptibilität des zu untersuchenden Nickels, war auch der Widerstand des sekundären Stromkreises bei den Vorversuchen mit Eisen und den späteren Untersuchungen des Nickels infolge verschiedener Anzahl und verschiedener Drahtstärke der Sekundärwindungen nicht der gleiche. Immerhin ergab die durch diese Rechnung gefundene Dimensionierung und Bewicklung des Nickelringes für die späteren Hauptversuche den gewollten Genauigkeitsgrad der Galvanometerausschläge. Auch bot die Grösse des Ofens für das Konstanthalten der Temperatur keine Schwierigkeiten.

3. Ringbewicklung.

Aus ca. 2 mm starken Nickelblechen *N* von Kahlbaum wurden Scheiben von ca. 36 mm innerem und ca. 76 mm äusserem Durchmesser herausgedreht und 35 solcher Ringe durch Übereinanderlegen zu einem Ring von ca. 70 mm Höhe und ca. 14 cm^2 Querschnitt vereinigt (siehe Fig. 1). Die genaue Ausmessung der einzelnen Ringe ergab folgende Mittelwerte:

innerer Durchmesser: $36{,}26_5$ mm; $r_1 = 18{,}13$ mm.
äusserer „ : $76{,}19_8$ „ ; $r_2 = 38{,}09_9$ „
mittlere Dicke einer Scheibe: $2{,}05_6$ „ .

Die gesamte Querschnittsfläche q war somit $14{,}36_9$ cm² und der nach Gleichung

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\log n \left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

(Seite 9) berechnete Radius

$$r_m = 26{,}89_1 \text{ mm.}^{1})$$

Die chemische Untersuchung, welche im chemischen Laboratorium der eidg. polyt. Schule ausgeführt wurde und für welche ich Herrn Professor Dr. F. Treadwell zu Dank verpflichtet bin, zeigte folgende Zusammensetzung des Nickelbleches:

Nickel:	98,08 %	
Kobalt:	1,31 „	ungefähr 2 % Verunreinigungen.
Eisen:	0,68 „	
unlösliche Rückstände:	0,11 „	

Schwierigkeiten bot die Bewicklung dieses Ringes mit einer primären und einer sekundären Lage von Windungen, welche Temperaturen bis zu ca. 400° C. aushalten sollten und doch gut isoliert sein mussten. Mit Asbest umwickelter Draht konnte nicht genommen werden, da Asbest in hohen Temperaturen für die notwendigen feinen Messungen zu wenig isolierend wirkt. Es kam daher blanker Kupferdraht I und II (Fig. 1) von 0,5 mm Durchmesser zur Anwendung, der zur Isolierung der einzelnen Windungen am inneren Umfange des Ringes durch Glasröhrchen K_1 von der Länge gleich der Ringhöhe gezogen wurde.

Falls eines der Röhrchen brechen sollte, befand sich noch sicherheitshalber zwischen dem Nickel und den Glasröhrchen eine isolierende Schichte Glimmer[2]). Glimmerscheiben[2]) trennten auch die radial verlaufenden Drahtpartien vom Nickel, während am äusseren Umfang ein über die Nickelringe gezogener Glaszylinder Z_1 zur Isolation diente. Da die Drähte hier ziemlich weit von einander entfernt lagen, so war es nicht notwendig, sie durch Röhrchen zu führen.

---

[1]) Der mittlere Radius betrug $\frac{r_2 + r_1}{2} = 28{,}115$ mm und war somit gegenüber r_m um 4,55 % zu gross. Daraus ist zu ersehen, dass es bei breiten Ringen nicht zulässig ist, die mittlere Feldstärke H_m nach dem mittleren Radius zu berechnen.

[2]) Der Deutlichkeit halber in der Figur nicht eingezeichnet.

Auf die primäre Lage von 57 Windungen folgten nun zur Isolation von der sekundären Bewicklung innen und aussen je ein Glaszylinder Z_2 und Z_3 und oben und unten Glimmerscheiben [1]).

Der sekundäre Draht lief am inneren Umfange gleichfalls durch Glasröhrchen K_2 und K_3. Es befanden sich hier zwei Lagen zu 45 und zu 46 Windungen, also zusammen für den Induktionskreis 91 Windungen. Die radial verlaufenden Drahtpartien der ersten Lage waren von denen der zweiten Lage gleichfalls durch Glimmerscheiben [1]) getrennt, während am äussern Umfange zwischen je zwei Drähten der einen Lage ein Draht der andern, durch Glimmerstreifen [1]) von einander isoliert, lag.

Es sei schon hier erwähnt, dass sich das Kupfer, trotzdem nur Temperaturen bis zu 400° C. angewendet wurden, ziemlich stark oxydierte, so dass gegen Ende der Versuche eine der äussersten Windungen riss, welcher Schaden jedoch durch Überspringen dieser Windung und durch Verlöten der nebenan befindlichen ausgebessert wurde. Für den späteren Verlauf der Experimente kamen somit nur 90 sekundäre Windungen in Betracht.

Sämtliche Lagen Glasröhrchen wurden mit Kaolinpaste bestrichen, damit bei etwaigem Bruch eines der Glasröhrchen keine Glassplitter sich loslösen könnten, was ein Blosslegen der Drähte zur Folge gehabt hätte.

Der ganze, durch die Glaszylinder, die Drahtwicklungen und die erhärtete Kaolinpaste starr gewordene Körper ruhte, isoliert durch quergelegte Porzellanröhrchen F auf dem unteren Heizboden P_2 des Ofens. Um einen Kurzschluss zweier benachbarter Windungen durch Kupferoxydteilchen, losgelöst von den Wandungen des Ofens, zu verhindern, wurde der bewickelte Nickelring noch durch Glimmerplatten E vom Mantel und vom Deckel des Ofens getrennt.

4. Elektrischer Ofen.

Die guten Erfolge, die die Herren P. N. Beck [2]) und A. Dumas [3]) in ihren Arbeiten über spezifische Wärme mit einem elektrisch geheizten, zylindrischen Ofen erzielten, gaben den Anlass, einen solchen von bedeutend grösseren Dimensionen in ähnlicher Weise zu konstruieren.

Um einen Kupferzylinder C_1 von 2 mm Wandstärke und 96 mm innerem Durchmesser wurde auf eine Höhe von 135 mm ein durch

[1]) Der Deutlichkeit halber in der Figur nicht eingezeichnet.

[2]) P. N. Beck: Inaugural-Dissertation, Zürich 1908. — Weiss et Beck: Chal. spéc. et champ moléculaire. J. de phys. 1908, 4e sér., t. 3, p. 5.

[3]) A. Dumas: Thèse, Zurich 1909. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 1909, t. XXVII.

Asbest isolierter Nickeldraht H_1 von 1 mm Durchmesser bifilar gewickelt (siehe Fig. 1). Dieser Heizzylinder steht in einem zweiten C_2

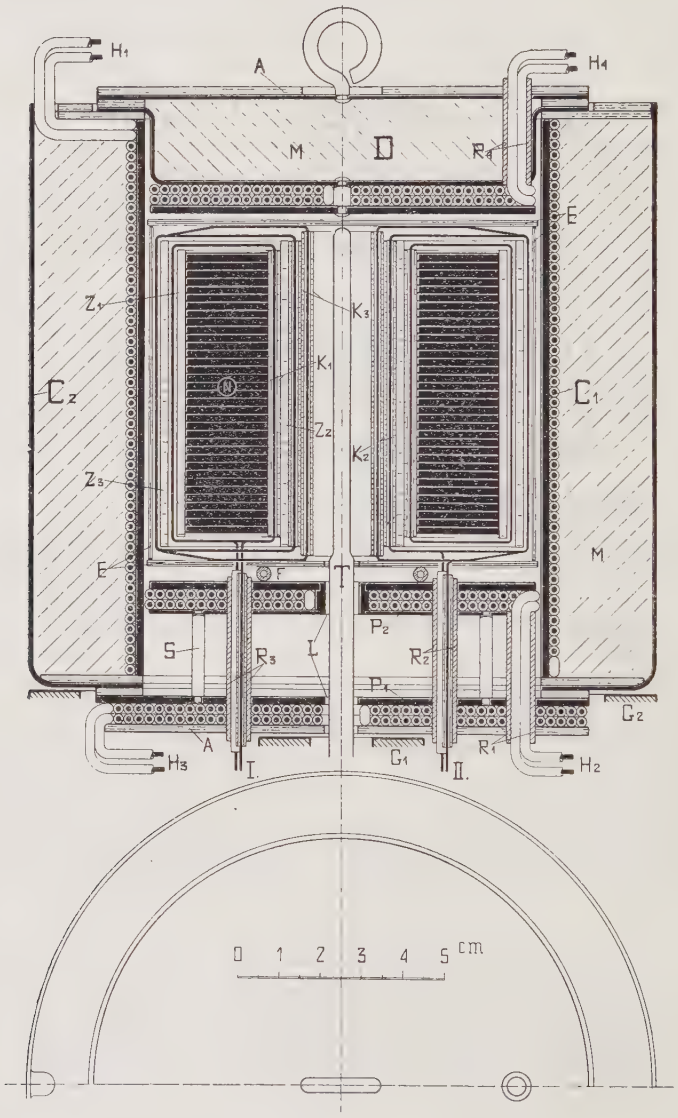


Fig. 1.

Elektrischer Ofen mit bewickeltem Nickelring.
(Vertikalschnitt und Draufsicht.)

von genügender Weite, um zwischen der Bewicklung und dem äusseren Zylinder einer ausreichenden Schichte Magnesia M zur Isolation gegen Wärmeverlust nach aussen Platz zu geben.

Das Ganze ruht auf einer Plattform P_1 und ist oben durch einen abhebbaren Deckel D geschlossen. Sowohl die Plattform als der Deckel ragen 20 mm in den zylindrischen Heizmantel, damit die Bewicklung desselben an beiden Enden Deckel und Plattform genügend übergreift, um im ganzen Raum des Ofens eine grösstmöglichste Konstanz der Temperatur zu erhalten.

Die in den Ofen eintretende, den Nickelring tragende Plattform P_2 hat doppelten Boden und nimmt zwischen den beiden Böden den bifilar und spiralförmig gewickelten, gleichfalls durch Asbest isolierten Nickeldraht H_2 auf, der durch eine Porzellanröhre R_1 nach aussen geleitet wird. Diese Plattform ist durch Stehbolzen S mit einer Grundplatte P_1 von grösserem Durchmesser fest verbunden, die auf einem ringförmigen Gestell G_1 ruht und am äusseren Umfange den Heizmantel trägt. Der Raum zwischen der Plattform und der Grundplatte ist mit Asbestschnüren ausgefüllt.

Ursprünglich ruhte der ganze Apparat mit der Grundplatte direkt auf dem Gestell. Da sich trotz Asbestisolierung eine starke Wärmeableitung in das Gestell bemerkbar machte (bei einer Temperatur von 444° C. im mittleren Teil des Ofens, betrug sie im untersten Teil nur 432° C.), wurde unter der Grundplatte ein zweiter Heizboden von bifilar und spiralförmig gewickeltem Nickeldraht H_3 angeordnet und gegen das Gestell durch Asbestplatten A isoliert.

Die zentrische Öffnung L in der Plattform dient zur Einführung des Platinwiderstands-Thermometers T in das Innere des Nickelringes. Durch die zwei durchgehenden Porzellanröhren R_2 und R_3 laufen die durch Glasröhrchen isolierten Zuleitungsdrähte der primären und sekundären Bewicklung I und II des Nickelringes.

Da der Mantel C_1 C_2 mit dem oberen Deckel D öfters abgehoben werden musste, so erwies sich eine zweite Unterstützung G_2 des abnehmbaren Teiles als sehr zweckmässig, um an dem festen Teil mit seiner schweren Belastung durch den Nickelring nicht zu rütteln.

Der in den Ofen eintretende Boden des Deckels D ist gleichfalls doppelwandig und mit bifilar und spiralförmig gewickeltem Nickeldraht H_4 versehen, der durch eine Porzellanröhre R_4 nach aussen geleitet wird. Das Innere des Deckels ist mit Magnesia M ausgefüllt; aufgelegte Asbestplatten A vermindern noch den Wärmeverlust durch Strahlung.

Sämtliche Nickeldrähte sind bifilar gewickelt, um keine magnetische Feldwirkung hervorzurufen. Sie sind hintereinander geschaltet und erwärmen sich durch den Joule'schen Effekt. Als Heizstrom diente Wechselstrom von 200 Volt Spannung. Das gute thermische Leitvermögen des Kupfers als Ofenmaterial bürgte für eine gleichmässige

Wärmeverteilung im Innern des Ofens, welche noch erhöht wurde, wenn sich der zu untersuchende Ring darin befand, der ja gleichfalls durch seine gute thermische Leitfähigkeit zum vollständigen Ausgleich der Temperatur beitrug.

Die Homogenität der Temperatur im Innern des Ofens wurde mittelst eines Thermoelementes von Le Chatelier [1]) geprüft, das aus zwei Drähten — der eine aus Platin und der andere aus einer Legierung von 90 % Platin und 10 % Rhodium — besteht, die an ihren, in den Ofen ragenden Enden verlötet sind. Die anderen freien Enden sind, um die erzeugte thermo-elektromotorische Kraft der Lötstelle zu messen, an die Klemmen eines Mikrovoltmeters von Siemens & Halske mit direkter Gradeinteilung angeschlossen. Die beiden Drähte wurden durch Glasröhrchen von einander isoliert, die, von einer Stativklammer gefasst, auf- und abgeschoben werden konnten, so dass die Lötstelle des Thermoelementes auf eine beliebige Höhe des Ofens einstellbar war. Durch Ein- und Ausschieben der Drähte aus den oberen, rechtwinklig umgebogenen, horizontalen Röhrchenenden, konnte die Lötstelle auch mehr oder weniger von der Achse des Ofens entfernt werden.

Die Temperaturmessungen, vorgenommen in verschiedenen Punkten in neun aufeinanderfolgenden, 1 cm von einander entfernten Ebenen ergab in den sieben mittleren Lagen eine vollständige Konstanz der Temperatur, in der obersten und der untersten Ebene sank die Temperatur bei ca. 400° C. um 1° C. Diese Differenz ist vollkommen zulässig, da sie bei tieferen Temperaturen ohnehin noch kleiner wird. In den einzelnen horizontalen Schnitten war die Temperatur vollkommen konstant.

Eine Aichung des Thermoelementes war nicht notwendig, da es sich nur um relative Temperaturunterschiede handelte.

5. Temperaturmesseinrichtung.

Bei den Versuchen wurde die Temperatur mittelst eines Platinwiderstandsthermometers *T* von W. C. Heraeus in Hanau gemessen, das, wie schon angedeutet, durch die zentrische Öffnung *L* im unteren Heizboden in das Innere des Ofens eingeführt wurde.

Das Widerstandsthermometer besteht in seinen hauptsächlichsten Teilen aus einer über eine Quarzglasröhre von 2 mm Durchmesser gewickelten Spirale aus chemisch-reinem, dünnen Platindraht, die sich über eine Länge von 55 mm erstreckt. Das Ganze ist in eine Quarzglasröhre von 4 mm Durchmesser eingeschlossen, die unten auf 6 mm erweitert ist, um den beiden ca. $^1/_2$ mm starken Zuleitungsdrähten

[1]) Le Chatelier et Boudouard: Mesure des températures élevées, 1900.

aus Silber, durch Röhrchen aus Quarzglas von einander isoliert, Platz zu geben.

Zur Aichung des Instrumentes wurde der Widerstand der Platinspirale bei drei verschiedenen Temperaturen mit einem Präzisions-Widerstandskasten von Carpentier, nach dem Prinzip der Wheatstoneschen Brücke konstruiert, gemessen, welcher erlaubt den Widerstand auf ein Tausendstel Ohm abzulesen. Bei Anwendung eines empfindlichen Galvanometers von Deprez-d'Arsonval kann noch durch Interpolation 0,0001 Ω bestimmt werden. Diese Genauigkeit ist mehr als genügend.

Es wurde darauf gesehen, dass das Thermometer nur so weit in die Substanz, deren Schmelz- beziehungsweise Verdampfungs-Temperatur aufgenommen werden sollte, eintauchte, als es in den Ofen ragt, um den Einfluss der Zuleitungsdrähte zu beseitigen, die durch Asbestscheiben gegen Wärmeausstrahlung sowohl der Aichungssubstanz, als auch des Versuchsofens geschützt wurden. Von einer Korrektur am Widerstande dieser Zuleitungsdrähte für die kleinen Temperaturschwankungen von kaum 2° im Versuchsraume konnte abgesehen werden.

Bei der Untersuchung des Schmelzpunktes von Blei wurde das Thermometer zum Schutz vor Zerspringen beim Erstarren des Metalles in eine Hartglasröhre gestellt. Um sicher zu sein, dass das Thermometer die Temperatur des geschmolzenen Bleies annimmt, wurde die Hartglasröhre mit Quecksilber gefüllt. Zur Kontrolle wurde die Temperatur noch mit einem Quecksilberthermometer mit Stickstoffüllung unter Druck, geaicht von der physikalischen Reichsanstalt, gemessen.

Für die folgenden Temperaturen wurde gefunden:

Schmelz- bezw. Siedepunkt von		Widerstand
schmelzendem Eis . .	0° C	$w_0 = 24{,}913\ \Omega$
Wasserdampf	98° C	$w_t = 34{,}366\ \Omega$
Blei	327° C	$w_t = 55{,}184\ \Omega$

und darauf die Koeffizienten a und b der Gleichung

$$w_t = w_0 (1 + a\,t - b\,t^2)$$

berechnet, worin w_0 der Widerstand bei 0° bedeutet. Es ergab sich

$$a = 0{,}003938$$

$$b = 0{,}000000681$$

Aus w_0, den beiden Koeffizienten a und b und dem jeweilen gefundenen Wert w_t des Thermometer-Widerstandes lässt sich die

Temperatur berechnen, die, in Funktion des Widerstandes w_t aufgetragen, die Aichungskurve des Thermometers gibt.

Ein Messdraht aus Konstantan, ein Widerstandskasten von Hartmann und Braun, ein Galvanometer und ein Akkumulator dienten, mit dem Platinwiderstands-Thermometer zu einer Wheatstone'schen Brücke vereinigt, zur Bestimmung des Widerstandes w_t der Platinspirale und damit der Temperatur im Ofen.

Auf der Messbrücke von 1 m Länge ist ein Schleifkontakt verschiebbar, der, mit dem Nullpunktgalvanometer verbunden, bei Nullage desselben den Messdraht in zwei Teile teilt, die im gleichen Verhältnis stehen, wie der als Vergleichswiderstand dienende, genau geaichte Widerstandskasten und der Widerstand des Platin-Thermometers.

Zur Aichung des Messdrahtes wurden zwei mit den Klemmen eines Galvanometers verbundene, auf dem Messdraht verschiebbare Schneiden in konstantem Abstand von 5 cm benützt. Wird durch den Messdraht ein konstant gehaltener Strom geschickt, so zeigt das Galvanometer einen, der Potentialdifferenz der beiden Schneiden entsprechenden Ausschlag an, der bei vollständiger Homogenität des Drahtes für jede Stellung der Schneiden konstant ist. Der Draht wurde nun in eine Anzahl gleicher Teile, gleich der Entfernung der beiden Schneiden, geteilt und die der Potentialdifferenz dieser Teilstücke proportionalen Ausschläge gemessen. Durch Division der Summe der Ausschläge bis zum n^{ten} Teilstück durch das Mittel aus der Summe sämtlicher Ausschläge wurde der korrigierte Wert der Messdrahtlänge bis zum n^{ten} Teilstück und daraus die jeweilige Korrektur gefunden.

Da die Zuleitungsdrähte vom Widerstandsthermometer bis zur Messbrücke einige Meter Länge hatten, so wurde deren vorher gemessener Widerstand berücksichtigt und jeweilen in Abzug gebracht.

6. Elektro-magnetische Messeinrichtung.

Primärer Stromkreis. Die primäre Bewicklung des Nickelringes wurde mit Strom aus zwei Akkumulatoren gespeist, welcher die nötigen Regulierwiderstände und einen Kommutator passierte. Seine Messung erfolgte mit einem Milliampèremeter von Siemens und Halske, das vorher genau geaicht wurde.

Zur Aichung dienten ein Normalwiderstand der physikalischen Reichsanstalt und ein Kompensationsapparat der „Land und Seekabelgesellschaft Nippes-Köln". Letzterer beruht auf dem Prinzip der Kompensationsmethode von Poggendorff und erlaubt durch Vergleich mit einer bekannten elektromotorischen Kraft und unter Zuhilfenahme

eines Galvanometers von Deprez-d'Arsonval Potentialdifferenzen in einfachster Weise zu messen.

Der Widerstand wurde nun mit dem zu aichenden Ampèremeter in den gleichen Stromkreis geschaltet, und die Potentialdifferenz an den Enden des Widerstandes mit dem Kompensationsapparat gemessen, dessen Skala Ablesungen von einem Tausendstel gestattet.

Im primären Stromkreis war noch eine Einrichtung angeordnet, um den Nickelring mit langsam abnehmendem Wechselstrom vollkommen entmagnetisieren zu können.

Sekundärer Stromkreis. Im sekundären Stromkreis des Nickelringes befanden sich ein Galvanometer von Deprez-d'Arsonval und eine Dämpfungsspule[1]), welche sich vorteilhaft erwies, da das Galvanometer an sich nicht gedämpft war. Dieses hatte ein sehr kleines Interferricum und eine leichte, mit genügend grosser Anzahl Windungen versehene Spule ohne Dämpfungsrahmen. Aufhängedraht und Feder von $0{,}17 \times 0{,}008$ mm^2 Querschnitt waren aus Phosphorbronze und hatten je den gleichen Widerstand von $9{,}5\,\Omega$ wie die Spule. Die Skala zur Beobachtung der Ausschläge befand sich vier Meter vom Galvanometerspiegel entfernt, wodurch die Genauigkeit der Ablesung noch vergrössert wurde.

Das Galvanometer zeigte, wie weiter unten angeführt wird, so gute Resultate, dass von einer Korrektur k für die Proportionalität der Ausschläge in der Gleichung

$$d = \delta - k\delta^3$$

abgesehen werden konnte. In obiger Gleichung ist δ der beobachtete und d der korrigierte Ausschlag; das Glied mit δ^2 entfällt, wenn die Nullage so eingestellt wird, dass die Ausschläge symmetrisch ausfallen.

Die Aichung des Galvanometers wurde mit einem Solenoid vollzogen, durch das ein konstant gehaltener Strom geschickt wurde, der beim Kommutieren in einer über das Solenoid zentrisch geschobenen Spule einen Induktionsstrom erregte, der in dem mit der Spule verbundenen Galvanometer einen Ausschlag hervorrief. Bei vollkommener Proportionalität müssen die Ausschläge beim Kommutieren des primären Stromes doppelt so gross sein, als allein beim Öffnen oder Schliessen, da die Elektrizitätsmenge, die im ersten Fall die Galvanometerspule durcheilt, doppelt so gross ist, als im zweiten. Die Stromrichtung wurde sowohl im Solenoid, als auch in der sekundären Spule umgekehrt, um etwaige Fehlereinflüsse zu eliminieren, was jeweilen vier Bestimmungen erforderte.

---

[1]) Rowland: Phil. Mag. 1873. Vol. XLVI, p. 147. — Ewing: loc. cit. Ch. III, p. 63.

Aus den durch Kommutieren und durch Schliessen oder Öffnen des primären Stromkreises gefundenen zwei Gleichungen liess sich nun der Koeffizient k berechnen. Er war so klein, dass der Unterschied der beobachteten Ausschläge δ und der berechneten d innerhalb der Ablesungsfehlergrenzen lag, also, wie schon angedeutet, nicht in Betracht kam.

Zur Bestimmung der Galvanometerkonstanten C in Gleichung (2) (Abschnitt 1) wurde das gleiche, vorerwähnte Solenoid mit dem gleichen Ring sekundärer Windungen benützt.

Unter Berücksichtigung des Einflusses der Solenoidenden entsteht im Innern des Solenoides eine magnetisierende Kraft

$$H_0 = \left[4\pi - 2\pi\left(\frac{d}{L}\right)^2\right] n i,$$

wenn durch die Windungen ein Strom von i absoluten Einheiten geschickt wird. In der Gleichung bedeuten d und L Durchmesser und Länge des Solenoides und n die Anzahl der Windungen pro Centimeter Solenoidlänge. Ist d' der Durchmesser der sekundären Spule von N' Windungen und q der Querschnitt des Solenoides, so ist die für die sekundäre Spule in Betracht kommende Gesamtzahl der Kraftlinien:

$$F = 4\pi i n q N' \left[1 - \frac{d'^2}{2L^2}\right].^{1)}$$

Beim Kommutieren des primären Stromes ändert sich der magnetische Kraftfluss um $2F$, welche Änderung nach gleichem Zu-

[1]) Da der Durchmesser d' der über das Solenoid zentrisch geschobenen sekundären Spule grösser ist, als derjenige d des Solenoides, so entsteht infolge der Differenz dieser beiden Durchmesser eine ausserhalb des Solenoidquerschnittes q liegende Ringfläche, in welcher die magnetisierende Kraft in entgegengesetzter Richtung wie diejenige H_0 im Innern des Solenoides wirkt und daher von dieser in Abrechnung zu bringen ist.

Zur Berechnung dieses abzuziehenden Feldes kann die Feldwirkung des Solenoides nach aussen zu mit derjenigen eines Stabmagneten verglichen werden, dessen Magnetisierungsintensität $J = ni$ ist und dessen Pole im Mittelpunkt der beiden Solenoidendflächen $q = \frac{\pi d^2}{4}$ sind. Die freien magnetischen Massen dieser Endflächen, deren Feldwirkung nach aussen zu allein in Betracht kommt, können zur Vereinfachung der Rechnung durch je eine in den Polen sich befindliche magnetische Masse mit gleicher Feldwirkung, wie die der Gesamtheit der magnetischen Massen $J \cdot q$ ersetzt werden.

Wenn die zentrisch über das Solenoid geschobene Spule symmetrisch zu den beiden Solenoidendflächen liegt, so üben die beiden Pole auf einen ausserhalb des Solenoides liegenden Punkt der sekundären Spule ein Feld aus von der Grösse

$$\Delta H = 2\frac{i q n}{R^2}\cos\sigma.$$

R ist der Abstand eines Poles von einem Punkt der Spulenmittelebene in der Entfernung y von der Solenoidachse

$$R = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}.$$

sammenhang, wie in Abschnitt (1) erwähnt, dem Galvanometerausschlag α proportional ist:

$$2F = C w \alpha.$$

Aus dieser Gleichung und Gleichung (2) kann nun die Induktion B bestimmt werden; die Galvanometerkonstante C und der Widerstand w des sekundären Stromkreises werden dabei eliminiert.

$$B = \frac{F}{q N_2 \alpha} \cdot x \tag{5}$$

Die im Abschnitt 3 erwähnte Oxydation des Kupferdrahtes und die dadurch bedingte Widerstandsänderung des sekundären Stromkreises wurde durch jeweilige Aichung der Galvanometer-Ausschläge vor und nach jedem Versuch eliminiert.

7. Empfindlichkeit und Genauigkeitsgrad.

Temperaturmessung. Die Empfindlichkeit des Nullpunktgalvanometers war so gross, dass am Messdraht 0,1 mm genau eingestellt werden konnten, was einer Genauigkeit von 0,2° entspricht. Dieser Genauigkeitsgrad war mehr als ausreichend, da infolge Anwendung von Wechselstrom zum Heizen Temperaturschwankungen von $^1/_2$° nicht vermieden werden konnten.

Elektro-magnetische Messungen. Bei Benützung von Stromstärken, die eine genaue Nadeleinstellung auf einen Teilstrich des

---

In Anbetracht der geringen Spulenbreite im Verhältnis zur Solenoidlänge ist es zulässig, alle Windungen in der Spulenmittelebene anzunehmen.

Der Cosinus des Winkels dieser Verbindungsgeraden R mit der Solenoidachse ist

$$\cos\sigma = \frac{L}{2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2}}.$$

Um die Anzahl der Kraftlinien durch die ausserhalb des Solenoidquerschnittes liegende Ringfläche der sekundären Spule für eine Windung zu erhalten, muss der Ausdruck für ΔH über diese Ringfläche integriert werden.

$$F_{1a} = iqnL \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d'}{2}} \frac{2\pi y\, dy}{\left[\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2\right]^{3/2}}$$

$$= 2\pi i q n L \left(\frac{d'^2}{L^3} - \frac{d^2}{L^3}\right).$$

Die durch die Ringfläche parallel zur Solenoidachse gehenden Kraftlinien für N' Windung der sekundären Spule sind somit

$$F_a = 2\pi i q n \left(\frac{d'^2}{L^2} - \frac{d^2}{L^2}\right) N'.$$

Diese müssen nun von den durch die Solenoidfläche gehenden Kraftlinien

$$F_s = 4\pi \left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{d}{L}\right)^2\right] n i q N'$$

subtrahiert werden, um F zu erhalten.

Ampèremeters im primären Stromkreise gestatten, beträgt der Fehler in den gemessenen Feldstärken H nur 1 bis 2‰.

Werden bei der Ablesung der Galvanometerausschläge Fehler von 0,1 mm zugelassen, so sind die Werte der Induktion B im Mittel auf 5‰ genau. Die gleiche Genauigkeit wird auch bei den Suszeptibilitätswerten k erzielt. Da die Galvanometerausschläge mit wachsender Temperatur zunehmen, so wächst damit auch der Genauigkeitsgrad.

8. Allgemeine Disposition.

Die Skala zur Ablesung der Galvanometerausschläge war, wie schon angedeutet, ca. 4 m vom Spiegel des Galvanometers entfernt.

Auf einem Tisch befanden sich die Dämpfungsspule für das Galvanometer, die Messbrücke und eine zweite Skala für das Nullpunktgalvanometer der Temperaturmesseinrichtung; ferner die Wippe zum Kommutieren des primären Stromkreises, die Ampèremeter und Regulierwiderstände des Heizstromes und des primären Stromkreises.

Der Ofen mit dem Nickelring war auf einem Nebentisch aufgestellt.

Es war somit möglich von einem Platze aus den Verlauf der Experimente zu überwachen und die einzelnen Messinstrumente zu beobachten und abzulesen.

II. Versuchsdurchführung.

Zur Ermittelung der anfänglichen Suszeptibilität für verschiedene Temperaturen waren folgende Operationen notwendig:

Nach dem Erwärmen des Nickelringes auf eine bestimmte konstant gehaltene Temperatur wurde

auf der Messbrücke die Temperatur des Nickelringes ermittelt,

am Milliampèremeter die Stromstärke i des primären Stromes und

am Galvanometer des sekundären Stromkreises die Ausschläge x beobachtet.

Dann wurden berechnet:

Die mittlere Feldstärke H_m aus i nach

$$H_m = \frac{2\,N_1}{r_2 - r_1} \cdot i \log n \left(\frac{r_2}{r_1}\right). \tag{1}$$

Die durch H_m hervorgerufene Induktion B aus x nach

$$B = \frac{F}{q\,N_2 \cdot \alpha} \cdot x. \tag{5}$$

Die Magnetisierungs-Intensität I aus B und H_m nach

$$I = \frac{B - H_m}{4\,\pi}. \tag{3}$$

Die Suszeptibilität k aus I und H_m nach

$$k = \frac{I}{H_m}. \tag{4}$$

Schliesslich wurde die anfängliche Suszeptibilität a graphisch auf folgende Weise gefunden. Die berechneten Suszeptibilitätswerte k wurden in Funktion der Feldstärke H_m aufgetragen und die gefundenen Punkte zu einer Kurve vereinigt. Der durch Extrapolation[1]) gefundene Schnitt dieser Kurve mit der Achse $H_m = 0$ gibt die anfängliche Suszeptibilität für das Feld $H = 0$.

9. Unregelmässigkeiten zu Beginn der Versuche.

Die ersten Untersuchungen bei gewöhnlicher (Umgebungs-) Temperatur ergaben für die nach $H = 0$ extrapolierte Suszeptibilitätskurve in Funktion des Feldes H eine anfängliche Suszeptibilität von $k = 2{,}50$ absoluten Einheiten, welcher Wert jedoch nach einmaligem Erhitzen auf ca. 350° C. und wieder Erkaltenlassen auf die Umgebungstemperatur auf 3,30 stieg. Bei nochmaligem Erhitzen auf die gleiche Temperatur von 350° C. und Abkühlenlassen erreichte er für die gewöhnliche Temperatur schon eine Höhe von 3,40 C. G. S.

Auch stiegen die Suszeptibilitätswerte für die verschiedenen Temperaturen. So wurde beispielsweise die Suszeptibilitätskurve für 320° C ermittelt, nachdem der Nickelring ca. 6 Stunden lang dieser Temperatur ausgesetzt war. Abgekühlt auf die Umgebungstemperatur und wieder auf 320° C. gebracht, zeigte er höhere Suszeptibilitätswerte.

Ähnliche Unregelmässigkeiten scheinen sich bei allen ferromagnetischen Substanzen zu zeigen[2]).

Es ist möglich, dass die anfängliche Suszeptibilität für gewöhnliche Temperatur vor dem Abdrehen der Ringe, bei welchem das Nickel erwärmt wurde, noch kleiner war.

Um zu erfahren, ob sich das Nickel durch oftmaliges Erhitzen und Erkaltenlassen schliesslich einem stationären Zustand nähere, wurde der Nickelring zehnmal auf 400° C. erhitzt und bis auf 200° C. abgekühlt, und die Temperatur bei 400° und bei 200° jeweilen sechs bis zwölf Stunden konstant gehalten.

Die anfängliche Suszeptibilität bei gewöhnlicher Temperatur stieg, je öfters erhitzt wurde, immer weniger und näherte sich schliesslich einem konstanten Betrage, der sich im Verlauf der Experimente nicht mehr änderte.

[1]) Lord Rayleigh: Phil. Mag. 1887, March., p. 225—245. — C. Baur: Inaugural-Dissertation, Zürich 1879. — C. Baur: Wied. Ann. XI. 1880, S. 245.

[2]) Wiedemann: Galvanismus II, § 522. — Perrier: Les variations thermiques de l'Hyst. tourn. et de l'Hyst. altern. Thèse, Zurich 1909, p. 40. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 1909, t. XXVII.

Dieser stationäre Zustand des Nickels wurde während der systematischen Untersuchungen von Zeit zu Zeit durch Aufnahme der Suszeptibilitätswerte bei gewöhnlicher Temperatur überprüft.

10. Umkehrbarkeit der Suszeptibilität.

Nachdem der Zustand des Nickels durch das oftmalige Erhitzen stationär geworden war, wurde die Suszeptibilität reversibel, d. h. die Suszeptibilitätskurve für eine bestimmte Temperatur blieb die gleiche, ob diese Temperatur durch Erwärmen oder durch Abkühlen erhalten worden war. Die Kurve der anfänglichen Suszeptibilität in Funktion der Temperatur ist somit eindeutig definiert. Um sich dieser Tatsache zu vergewissern, wurde die Bestimmung der anfänglichen Suszeptibilität des öftern zweimal vorgenommen; einmal für die bestimmte Temperatur, erhalten durch Abkühlen, das andere Mal bei gleicher Temperatur, erhalten durch Erhitzen. Die einzelnen Punkte einer Suszeptibilitätskurve in Funktion der Feldstärke H wurden stets für wachsende und abnehmende Felder aufgenommen, um auch die Umkehrbarkeit der Suszeptibilität bei konstanter Temperatur zu zeigen.

11. Eigentliche Versuchsdurchführung.

Der Nickelring wurde erhitzt und auf eine bestimmte Temperatur gebracht und diese mittelst des Nullpunktgalvanometers der Temperaturmesseinrichtung konstant gehalten. Die Dauer der nötigen Erhitzung, um im Ring in allen seinen Teilen eine gleichförmige Temperatur zu erzielen, variierte zwischen 2 und 3 Stunden.

Bei den Untersuchungen war es unbedingt notwendig, dass der Nickelring und der Ofen die gleiche, einheitliche und stationäre Temperatur hatten; denn nur dadurch war es möglich, dass die einzelnen beobachteten Werte von einander nicht um grössere Beträge abwichen, als solche, die noch innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Apparate fallen.

Temperaturschwankungen von $^1/_2{}^\circ - 1^\circ$ konnten noch als zulässig angenommen werden (s. Abschnitt 7).

Eine Erwärmung des Nickelringes durch den primären Strom kam nicht in Betracht, da zur Erzeugung der Feldstärken nur Stromstärken bis zu 0,012 Ampère angewendet wurden.

In den höheren Temperaturen von ca. 340° aufwärts, bei welchen die anfänglichen Suszeptibilitäten sehr rasch mit der Temperatur anwachsen, wurden die einzelnen Werte einer Suszeptibilitätskurve mehrmals aufgenommen, da kleine Temperaturschwankungen in dieser Region grosse Änderungen der Suszeptibilitätswerte zur Folge haben.

Nachdem bei einer bestimmten Temperatur der stationäre Zustand eingetreten war, wurden die Seite 22 erwähnten Operationen ausgeführt. Vor dem Beobachten der Galvanometer-Ausschläge wurde der primäre Strom mehrmals kommutiert, um sicher zu sein, dass das Nickel die der Feldstärke H entsprechende Induktion B angenommen hatte.

Im Ganzen wurden Versuche mit elf verschiedenen Stromstärken i von 0,00102 bis 0,01193 Ampère und bei 21 verschiedenen Temperaturen von 18,5° bis 358° C. vorgenommen.

Bei 359° C. und darüber zeigte das Galvanometer nur Ausschläge bis ca. 2 mm, die verschwindend klein waren gegenüber den bei niedrigeren Temperaturen beobachteten.

Diese minimalen Ausschläge entsprechen einerseits der sehr kleinen Magnetisierungs-Intensität des nunmehr in den paramagnetischen Zustand übergegangenen Nickelringes (s. Seite 36), anderseits auch der Induktion des von den primären Windungen eingeschlossenen Ringraumes.

12. Tabellen.

Die durch die Experimente gefundenen Resultate sind in nachfolgenden Tabellen zusammengestellt und in Fig. 2—4 bildlich dargestellt.

i Amp.	H C.G.S.	$t = 18{,}5°$ C.				$t = 26°$ C.			
		x mm	B C.G.S.	I C.G.S.	k C.G.S.	x mm	B C.G.S.	I C.G.S.	k C.G.S.
0,00201	0,00853$_6$	13,27	0,4036	0,03143	3,68$_2$	13,35	0,4140	0,03226	3,77$_9$
0,00300	0,01274	19,78	0,6015	0,04685	3,67$_7$	19,88	0,6167	0,04806	3,77$_2$
0,00399$_9$	0,01695	26,32	0,8002	0,06239	3,68$_3$	26,52	0,8224	0,06409	3,78$_1$
0,00499	0,02115	32,84	0,9988	0,07779	3,67$_8$	33,04	1,024$_7$	0,07986	3,77$_5$
0,00598	0,02535	39,46	1,200	0,09347	3,68$_7$	39,71	1,231$_4$	0,09597	3,78$_5$
0,00697	0,02956	45,98	1,398$_3$	0,1089$_2$	3,68$_4$	46,23	1,433$_8$	0,1117$_4$	3,78$_0$
0,00796$_8$	0,03377	52,57	1,598$_7$	0,1245$_3$	3,68$_7$	58,86	1,639$_3$	0,1277$_6$	3,78$_3$
0,00995	0,04218	65,67	1,997	0,1555$_5$	3,68$_7$	66,05	2,048$_3$	0,1596$_4$	3,78$_4$
0,01193	0,05059	78,74	2,394	0,1864$_8$	3,68$_6$	79,28	2,458$_5$	0,1916$_1$	3,78$_7$

i	H	$t = 47°$				$t = 65°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00102	0,00432$_4$	7,12	0,2165	0,01688	3,90$_3$	—	—	—	—
0,00201	0,00853$_6$	14,06	0,4276	0,03334	3,90$_5$	14,51	0,4402	0,03435	4,02$_4$
0,00300	0,01274	20,94	0,6369	0,04966	3,89$_7$	21,65	0,6571	0,05127	4,02$_4$
0,00399$_9$	0,01695	27,94	0,8497	0,06626	3,90$_9$	28,81	0,8739	0,06819	4,02$_3$
0,00499	0,02115	34,79	1,058$_0$	0,08250	3,90$_0$	—	—	—	—
0,00598	0,02535	41,88	1,273$_8$	0,09934	3,91$_8$	43,14	1,308$_8$	0,1021$_3$	4,02$_8$
0,00697	0,02956	48,66	1,480$_0$	0,1154$_2$	3,90$_4$	50,30	1,526$_2$	0,1190$_9$	4,02$_8$
0,00796$_8$	0,03377	55,73	1,694$_9$	0,1321$_8$	3,91$_4$	—	—	—	—
0,00995	0,04218	69,60	2,116$_8$	0,1650$_9$	3,91$_3$	—	—	—	—
0,01193	0,05059	83,38	2,535$_6$	0,1977$_5$	3,90$_8$	86,14	2,613$_5$	0,2039$_5$	4,03$_1$

i	H	$t = 80°$				$t = 100°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	14,48	0,4504	0,03516	4,11$_9$	15,33	0,4651	0,03633	4,25$_6$
0,00300	0,01274	21,63	0,6727	0,05251	4,12$_1$	—	—	—	—
0,00399$_9$	0,01695	28,70	0,8923	0,06965	4,10$_9$	30,43	0,9233	0,07212	4,25$_4$
0,00499	0,02115	35,93	1,117$_3$	0,08722	4,12$_3$	—	—	—	—
0,00598	0,02535	43,02	1,337$_5$	0,1044$_1$	4,11$_8$	45,59	1,383$_2$	0,1080$_5$	4,26$_2$
0,00697	0,02956	50,24	1,562$_1$	0,1219$_5$	4,12$_5$	53,13	1,612$_2$	0,1259$_4$	4,26$_0$
0,00796$_8$	0,03377	57,37	1,783$_8$	0,1392$_6$	4,12$_3$	—	—	—	—
0,00995	0,04218	71,69	2,228$_8$	0,1740$_0$	4,12$_5$	—	—	—	—
0,01193	0,05059	86,13	2,678$_0$	0,2090$_8$	4,13$_2$	91,09	2,763$_8$	0,2159$_1$	4,26$_7$

i	H	$t = 124,5°$				$t = 150°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	15,62	0,4857	0,03797	4,44$_8$	16,69	0,5076	0,03971	4,65$_2$
0,00300	0,01274	23,28	0,7239	0,05659	4,44$_1$	24,91	0,7576	0,0592$_7$	4,65$_2$
0,00399$_9$	0,01695	31,00	0,9637$_9$	0,07534	4,44$_4$	33,08	1,006$_0$	0,07870	4,64$_3$
0,00499	0,02115	38,64	1,201$_4$	0,09392	4,44$_0$	41,34	1,257$_4$	0,09837	4,65$_1$
0,00598	0,02535	46,49	1,445$_3$	0,1129$_9$	4,45$_7$	49,66	1,510$_3$	0,1181$_6$	4,66$_1$
0,00697	0,02956	54,13	1,682$_9$	0,1315$_6$	4,45$_0$	57,80	1,757$_6$	0,1375$_1$	4,65$_3$
0,00796$_8$	0,03377	61,79	1,921$_1$	0,1501$_8$	4,44$_7$	66,21	2,013$_6$	0,1575$_4$	4,66$_5$
0,00995	0,04218	77,28	2,402$_8$	0,1878$_5$	4,45$_3$	82,59	2,511$_7$	0,1965$_1$	4,65$_8$
0,01193	0,05059	92,76	2,884$_0$	0,2254$_7$	4,45$_8$	99,35	3,021$_2$	0,2363$_9$	4,67$_2$

i	H	$t = 179°$				$t = 204°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00102	0,00432$_4$	—	—	—	—	9,38	0,2846	0,02230	5,15$_7$
0,00201	0,00853$_6$	17,19	0,5346	0,04186	4,90$_4$	18,50	0,5613	0,04398	5,15$_2$
0,00300	0,01274	25,61	0,7963	0,06235	4,89$_4$	27,65	0,8389	0,06574	5,16$_0$
0,00399$_9$	0,01695	34,17	1,062$_4$	0,08319	4,90$_7$	36,68	1,113$_0$	0,08722	5,14$_5$
0,00499	0,02115	42,62	1,325$_3$	0,1037$_8$	4,90$_6$	45,92	1,393$_4$	0,1092$_0$	5,16$_3$
0,00598	0,02535	51,19	1,591$_7$	0,1246$_4$	4,91$_6$	55,00	1,668$_7$	0,1307$_7$	5,15$_8$
0,00697	0,02956	59,71	1,856$_3$	0,1453$_6$	4,91$_7$	64,22	1,948$_4$	0,1526$_9$	5,16$_5$
0,00796$_8$	0,03377	68,16	2,119$_2$	0,1659$_5$	4,91$_4$	73,35	2,225$_6$	0,1744$_2$	5,16$_5$
0,00995	0,04218	85,21	2,649$_2$	0,2074$_6$	4,91$_8$	—	—	—	—
0,01193	0,05059	102,19	3,177$_3$	0,2488$_1$	4,91$_8$	—	—	—	—

i	H	$t = 220°$				$t = 244°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	18,80	0,5846	0,04584	5,37$_0$	20,29	0,6191	0,04858	5,69$_1$
0,00300	0,01274	28,15	0,8752	0,06863	5,38$_6$	30,27	0,9236	0,07248	5,68$_9$
0,00399$_9$	0,01695	37,38	1,162$_3$	0,09114	5,37$_6$	40,31	1,229$_1$	0,09645	5,69$_0$
0,00499	0,02115	46,77	1,454$_2$	0,1140$_3$	5,39$_1$	50,24	1,536$_1$	0,1205$_5$	5,69$_9$
0,00598	0,02535	56,00	1,741$_1$	0,1365$_3$	5,385	60,44	1,844$_1$	0,1447$_3$	5,70$_9$
0,00697	0,02956	65,49	2,036$_2$	0,1596$_8$	5,40$_1$	70,51	2,151$_3$	0,1688$_4$	5,71$_1$
0,00796$_8$	0,03377	74,83	2,326$_6$	0,1824$_5$	5,40$_2$	80,54	2,457$_4$	0,1928$_6$	5,71$_0$
0,00995	0,04218	93,46	2,905$_8$	0,2278$_7$	5,40$_2$	100,84	3,076$_7$	0,2414$_7$	5,72$_4$
0,01193	0,05059	112,25	3,489$_9$	0,2736$_9$	5,40$_9$	120,98	3,691$_2$	0,2897$_1$	5,72$_6$

i	H	$t = 275°$				$t = 293°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	22,09	0,6741	0,05296	6,20$_4$	23,10	0,7184	0,05648	6,61$_6$
0,00300	0,01274	32,97	1,006$_2$	0,07905	6,20$_4$	34,45	1,071$_4$	0,08424	6,61$_2$
0,00399$_9$	0,01695	43,90	1,339$_5$	0,1052$_4$	6,20$_8$	45,88	1,427$_1$	0,1122$_1$	6,62$_0$
0,00499	0,02115	54,91	1,675$_3$	0,1316$_3$	6,22$_3$	57,48	1,787$_6$	0,1405$_6$	6,64$_5$
0,00598	0,02535	65,90	2,010$_6$	0,1579$_8$	6,23$_1$	68,81	2,140$_1$	0,1682$_8$	6,63$_8$
0,00697	0,02956	76,89	2,346$_1$	0,1843$_4$	6,23$_6$	80,40	2,500$_4$	0,1966$_2$	6,65$_1$
0,00796$_8$	0,03377	87,89	2,681$_5$	0,2106$_9$	6,23$_8$	91,78	2,854$_3$	0,2244$_5$	6,64$_8$
0,00995	0,04218	109,92	3,353$_6$	0,2635$_1$	6,24$_7$	115,02	3,577$_2$	0,2813$_0$	6,66$_9$
0,01193	0,05059	132,00	4,027$_3$	0,3164$_5$	6,25$_5$	138,14	4,296$_4$	0,3378$_7$	6,67$_8$

i	H	$t = 309°$				$t = 322°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00102	0,00432$_4$	12,66	0,3841	0,03022	6,988	—	—	—	—
0,00201	0,00853$_6$	25,04	0,7598	0,0597$_8$	7,003	26,50	0,8085	0,06365	7,45$_6$
0,00300	0,01274	37,26	1,130$_4$	0,0889$_4$	6,98$_1$	39,67	1,210$_3$	0,09529	7,47$_9$
0,00399$_9$	0,01695	49,75	1,509$_7$	0,1187$_8$	7,00$_7$	52,73	1,608$_8$	0,1266$_7$	7,47$_3$
0,00499	0,02115	62,23	1,888$_1$	0,1485$_6$	7,02$_4$	66,03	2,014$_5$	0,1586$_2$	7,49$_9$
0,00598	0,02535	74,64	2,264$_8$	0,1782$_0$	7,02$_9$	79,17	2,415$_7$	0,1902$_1$	7,50$_3$
0,00697	0,02956	87,00	2,639$_6$	0,2077$_0$	7,02$_6$	92,50	2,822$_1$	0,2222$_2$	7,51$_7$
0,00796$_8$	0,03377	99,58	3,021$_4$	0,2377$_4$	7,03$_9$	105,78	3,227$_3$	0,2541$_3$	7,52$_5$
0,00995	0,04218	124,74	3,784$_6$	0,2978$_1$	7,06$_0$	132,41	4,040$_1$	0,3181$_4$	7,54$_2$
0,01193	0,05059	149,86	4,546$_9$	0,3578$_0$	7,07$_2$	159,15	4,855$_9$	0,3854$_6$	7,56$_2$

i	H	$t = 333°$				$t = 344°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	27,59	0,8583	0,06762	7,92$_1$	31,08	0,9482	0,07477	8,75$_5$
0,00300	0,01274	41,31	1,284$_9$	0,1012$_3$	7,94$_5$	46,64	1,423$_0$	0,1122$_2$	8,80$_8$
0,00399$_9$	0,01695	55,10	1,713$_6$	0,1350$_1$	7,96$_5$	62,03	1,892$_7$	0,1492$_6$	8,80$_5$
0,00499	0,02115	68,78	2,139$_1$	0,1685$_4$	7,96$_8$	77,96	2,372$_5$	0,1871$_1$	8,84$_7$
0,00598	0,02535	82,70	2,571$_9$	0,2026$_4$	7,99$_3$	93,22	2,844$_4$	0,2243$_3$	8,84$_9$
0,00697	0,02956	96,51	3,001$_4$	0,2364$_9$	8,00$_0$	109,26	3,333$_5$	0,2629$_1$	8,89$_4$
0,00796$_8$	0,03377	110,47	3,435$_9$	0,2707$_3$	8,01$_6$	124,88	3,810$_2$	0,3005$_1$	8,89$_8$
0,00995	0,04218	138,32	4,301$_8$	0,3389$_7$	8,03$_6$	156,60	4,778$_0$	0,3768$_6$	8,93$_4$
0,01193	0,05059	166,61	5,181$_5$	0,4083$_0$	8,07$_0$	188,69	5,757$_1$	0,4541$_1$	8,97$_6$

i	H	$t = 353°$				$t = 357°$			
		x	B	I	k	x	B	I	k
0,00102	0,00432$_4$	—	—	—	—	21,07	0,6394	0,05053	11,68$_5$
0,00201	0,00853$_6$	34,73	1,081$_1$	0,08535	9,99$_8$	41,61	1,262$_6$	0,09979	11,69$_0$
0,00300	0,01274	51,95	1,617$_2$	0,1276$_7$	10,02$_1$	62,51	1,896$_7$	0,1499$_2$	11,76$_7$
0,00399$_9$	0,01695	69,49	2,163$_3$	0,1708$_0$	10,07$_6$	83,57	2,535$_5$	0,2004$_2$	11,82$_4$
0,00499	0,02115	86,80	2,702$_0$	0,2133$_3$	10,08$_6$	105,00	3,185$_7$	0,2518$_2$	11,90$_6$
0,00598	0,02535	104,76	3,261$_1$	0,2574$_9$	10,15$_7$	126,53	3,838$_9$	0,3034$_7$	11,97$_1$
0,00697	0,02956	122,32	3,807$_8$	0,3006$_6$	10,17$_1$	148,10	4,493$_3$	0,3552$_1$	12,01$_6$
0,00796$_8$	0,03377	140,25	4,365$_9$	0,3447$_4$	10,20$_8$	170,06	5,159$_8$	0,4079$_1$	12,07$_9$
0,00896	0,03798	—	—	—	—	191,60	5,813$_3$	0,4595$_8$	12,10$_0$
0,00995	0,04218	175,99	5,478$_7$	0,4326$_1$	10,25$_6$	214,76	6,515$_8$	0,5151$_5$	12,21$_3$
0,01193	0,05059	212,79	6,624$_3$	0,5231$_1$	10,34$_0$	260,47	7,902$_7$	0,6248$_5$	12,35$_1$

i	H	$t = 358°$			
		x	B	I	k
0,00201	0,00853$_6$	23,67	0,7370	0,05796	6,79$_0$
0,00300	0,01274	35,50	1,1051	0,08692	6,82$_2$
0,00399$_9$	0,01695	49,01	1,525$_6$	0,1200$_5$	7,08$_2$
0,00499	0,02115	62,33	1,940$_0$	0,1526$_9$	7,21$_9$
0,00598	0,02535	74,68	2,324$_7$	0,1829$_7$	7,21$_7$
0,00697	0,02956	87,66	2,728$_8$	0,2147$_9$	7,26$_6$
0,00796$_8$	0,03377	100,31	3,122$_6$	0,2458$_0$	7,27$_8$
0,00995	0,04218	130,55	4,064$_0$	0,32004	7,58$_7$
0,01193	0,05059	158,18	4,924$_1$	0,3878$_2$	7,66$_5$

13. Verlauf der Suszeptibilitäts-Kurven.

Aus den Fig. 2 und 3 ist zu ersehen, dass die Suszeptibilitätskurven durchwegs geradlinig sind; die Werte für H wurden aber auch nur so gross gewählt, als sie in das Bereich der Geraden fallen. Wie in der Einleitung bemerkt, fanden schon C. Baur und Lord Rayleigh in sehr schwachen Feldern für die Magnetisierungs-Intensität I in Funktion des Feldes H einen parabolischen Verlauf

$$I = a\,H + b\,H^2$$

und somit für die Suszeptibilität k

$$k = a + b\,H$$

die Gleichung einer Geraden. In den Gleichungen bedeuten a die anfängliche Suszeptibilität für ein Feld $H = 0$ und b die Tangente der Suszeptibilitätsgeraden.

Neben der anfänglichen Suszeptibilität a wurde auch jeweilen die „anfängliche" Neigung b der Suszeptibilitäts-Kurven (-Geraden) für die verschiedenen Temperaturen bestimmt.

Unter Annahme eines homogenen Feldes gleich der mittleren Feldstärke

$$H_m = \frac{2\,N_1\,i}{(r_2 - r_1)}\ \log n\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \qquad (1)$$

(Seite 9) könnten die anfänglichen Neigungen

$$b' = \frac{k - a}{H_m}$$

aus den Figuren 2 und 3 direkt entnommen werden, da die Suszeptibilitäten k in Funktion von H_m aufgetragen wurden.

Da das Feld jedoch nicht homogen ist, so ergibt sich b aus der Gleichung für die Induktion B wie folgt:

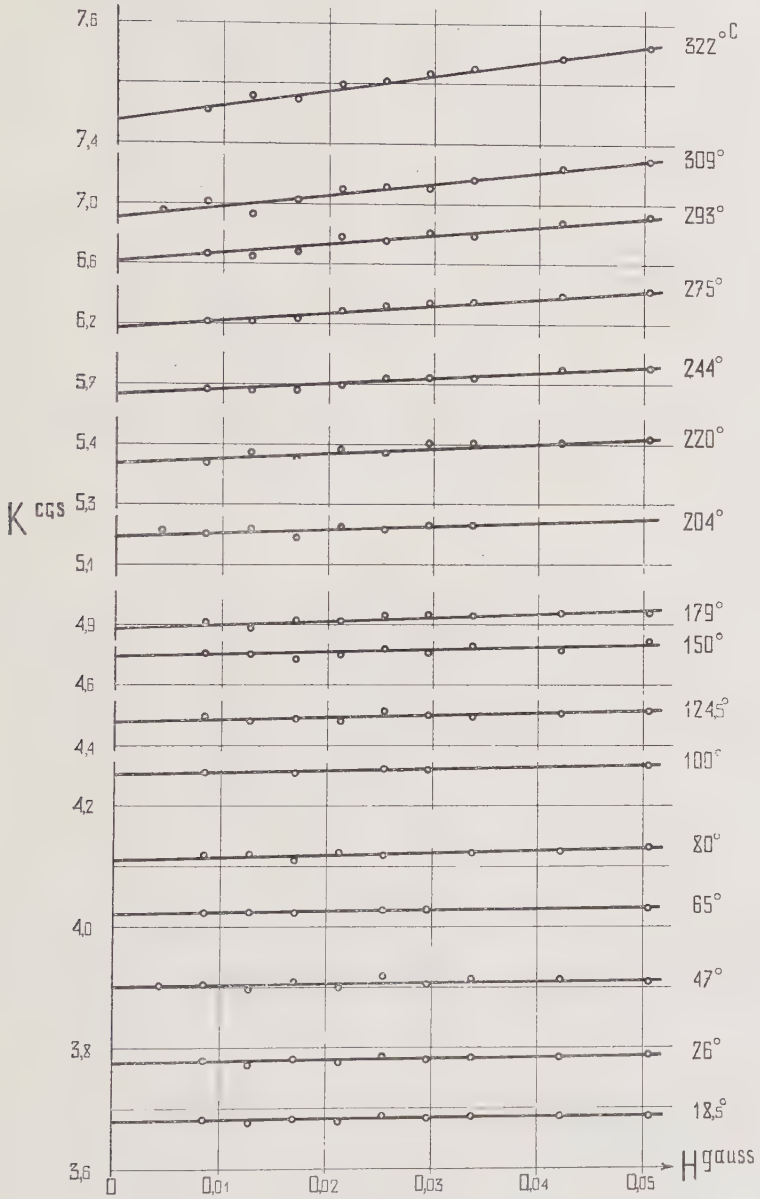


Fig. 2.

Die Suszeptibilität k in Funktion der Feldstärke H.

Die in einem Flächenelement $h\,dr$ erzeugte Induktion ist

$$dB = [(1 + 4\pi a)H + 4\pi b H^2]\,h\,dr$$

oder, da

$$H = \frac{2N_1 i}{r},$$

$$dB = (1 + 4\pi a)\, 2 N_1 i h \frac{dr}{r} + 4\pi b h (2 N_1 i)^2 \frac{dr}{r^2}$$

und somit die im gesamten Querschnitt auftretende Induktion

$$B = (1 + 4\pi a)\, 2 N_1 i h \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} + 4\pi b h (2 N_1 i)^2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}$$

$$= (1 + 4\pi a)\, 2 N_1 i h \operatorname{lgn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + 4\pi b h (2 N_1 i)^2 \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}.$$

Daraus berechnet sich

$$b = \frac{B - (1 + 4\pi a)\, 2 N_1 i h \operatorname{lgn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{4\pi h (2 N_1 i)^2 \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2}}. \qquad (6)$$

Für das oben genannte homogene Feld H_m wäre in analoger Weise

$$b' = \frac{B - (1 + 4\pi a)\, 2 N_1 i h \operatorname{lgn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{4\pi h (2 N_1 i)^2 \frac{r_2 - r_1}{r_m^2}}, \qquad (6')$$

worin

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\operatorname{lgn}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

den auf Seite 9 angegebenen Radius der mittleren magnetisierenden Kraft H_m bedeutet.

Da sich die beiden Werte b und b' nur durch die Faktoren

$$f = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \text{ und } f' = \frac{r_m^2}{r_2 - r_1}$$

unterscheiden und diese Faktoren durch die Gleichung

$$f = f' \frac{r_1 \cdot r_2}{r_m^2} = f'\ 0{,}9553$$

zusammenhängen, so können die wahren anfänglichen Neigungen b direkt aus den in den Fig. 2 und 3 dargestellten Neigungen b' durch Multiplikation mit 0,9553 gefunden werden, denn diese sind mit den aus Gleichung (6′) sich ergebenden identisch. Es ist somit

$$b = b'\ 0{,}9553. \qquad (7)$$

Nachfolgende Tabelle zeigt den Zusammenhang von a, b' und b mit der Temperatur.

$t°$ C.	a C.G.S.	b'	b	$t°$ C.	a C.G.S.	b'	b	$t°$ C.	a C.G.S.	b'	b
18,5	3,681	0,161	0,154	150,0	4,646	0,411	0,393	309,0	6,975	1,994	1,905
26,0	3,778	0,166	0,158	179,0	4,897	0,526	0,502	322,0	7,438	2,515	2,402
47,0	3,904	0,196	0,187	204,0	5,140	0,622	0,594	333,0	7,899	3,238	3,093
65,0	4,018	0,219	0,209	220,0	5,374	0,741	0,708	344,0	8,735	4,756	4,543
80,0	4,111	0,247	0,236	244,0	5,683	0,901	0,861	353,0	9,908	8,416	8,040
100,0	4,256	0,285	0,272	275,0	6,196	1,271	1,214	357,0	11,652	15,230	14,548
124,5	4,442	0,338	0,323	293,0	6,597	1,582	1,511	358,0	6,685	20,081	19,183

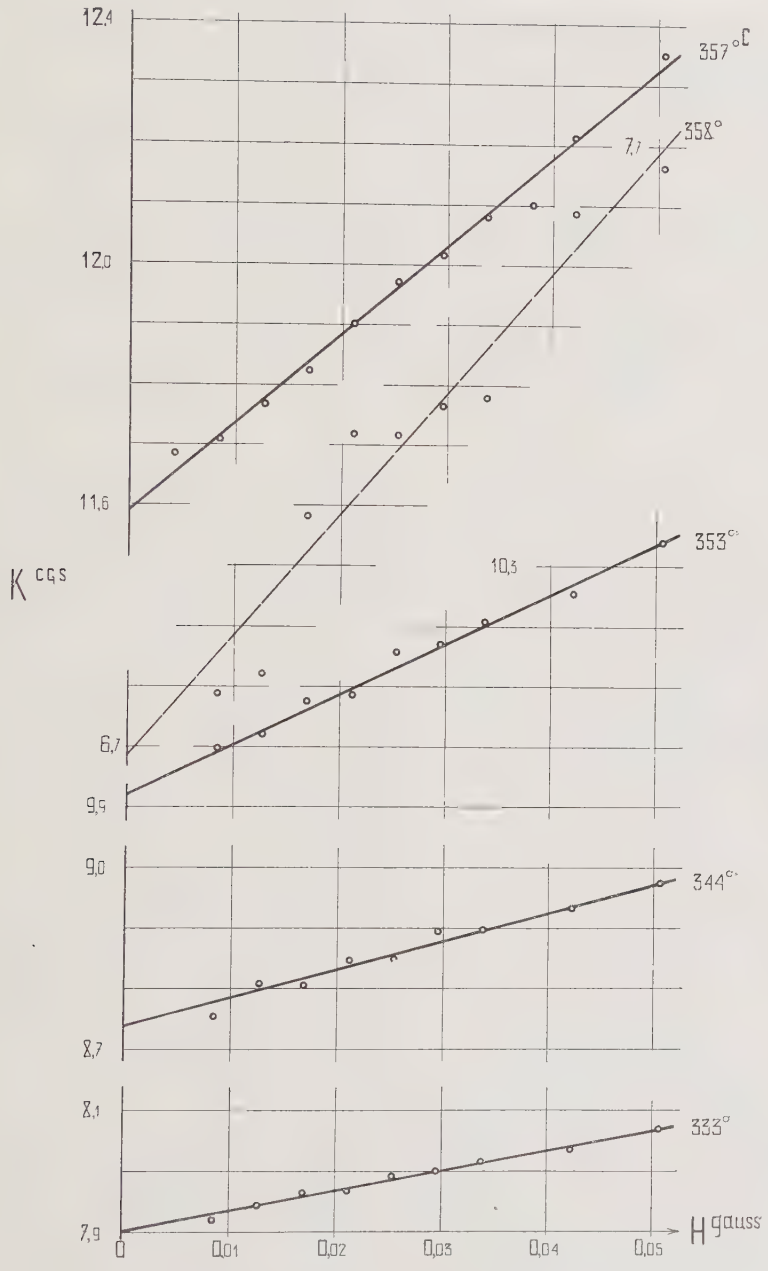


Fig. 3.
Die Suszeptibilität k in Funktion der Feldstärke H.

14. Umwandlungspunkt.

Für das Nickel, das der Untersuchung zu Grunde lag, müsste die gefundene Grenztemperatur von 395° C. (siehe Seite 25) dem auf Seite 35 definierten Umwandlungspunkte entsprechen.

Sie ist aber auffallend niedriger (um 10°—15°) als die Umwandlungstemperaturen, welche für Nickel bei verschiedenen früheren Versuchen ermittelt wurden.

Hopkinson[1]) fand allerdings eine noch bedeutend tiefere Umwandlungstemperatur von 310° C., aber bei „unreinem" Nickel.

Das hier untersuchte kann zwar mit 2 % fremden Stoffen auch nicht als reines Nickel, wie es im Handel bezeichnet wird, gelten, aber immerhin ergaben Nickelsorten gleicher Provenienz bei Versuchen im physikal. Laboratorium der eidg. polytechnischen Schule wesentlich höhere Umwandlungstemperaturen bis zu 376°.

Diese auffallende Differenz der Umwandlungstemperaturen wird weiter unten noch besprochen, bezw. erklärt werden (s. Seite 35 und 45—47).

III. Zusammenstellung und Diskussion der Resultate.

Aus den Fig. 2 und 3, in welchen die Suszeptibilitäten k in Funktion der Feldstärken H für verschiedene Temperaturen aufgetragen sind, ist ersichtlich, dass für die niederen Temperaturen die Neigungen der Suszeptibilitätsgeraden sehr gering, nur wenig von einander verschieden sind und erst in höheren Temperaturen rasch zunehmen. Die anfängliche Suszeptibilität a, die Ordinate des Schnittpunktes der Suszeptibilitätskurve mit der Achse $H = 0$, wächst auch anfangs langsam, ganz regelmässig und nimmt erst in den höheren Temperaturen rasch zu. Die richtige Lage der einzelnen Suszeptibilitätsgeraden zu einander zeigt Fig. 4.

In Fig. 5 sind die Werte der anfänglichen Suszeptibilität und der anfänglichen Neigung der zugehörenden Suszeptibilitätskurven, wie sie aus Formel (7) Seite 30 ermittelt wurden, in Funktion von der Temperatur aufgetragen. Aus dieser Figur ist auch die Art des Verlaufes von a und b mit wachsender Temperatur erkennbar. Die beiden Kurven steigen zuerst allmählich, dann immer rascher, besonders b wächst gegen den Umwandlungspunkt zu rapid.

Bis 357° C. ist der Verlauf der beiden Kurven ein stetiger; die Untersuchung bei 358° C. zeigt jedoch eine Unstetigkeit. Während die Neigung b noch steiler wird ($b = 19{,}183$), die b-Kurve also stetig weiter steigt, sinkt der zugehörige Wert von a plötzlich auf 6,685. Ähnliche Unstetigkeiten der Kurven sind auch von Ewing[2]) für die Permeabilität von Stahl und Eisen angeführt. Die Kurve der anfänglichen Suszeptibilität scheint also bei ungefähr 357° C. in eine Spitze

[1]) Hopkinson: Proc. Royl. Soc., Vol. XLIV, 1888, p. 317. — du Bois: Phil. Mag. 1890, April. — Morris: Phil. Mag. 1897, September.

[2]) Ewing: Magn. Ind. in Iron. 3th ed. London, Ch. VIII, p. 172—175.

auszulaufen und dann in der Nähe des Umwandlungspunktes bei 359° C. gegen 0 zu fallen. Beim Abkühlen zeigte sich das Umgekehrte; die Werte steigen sehr rasch an und nehmen dann nach der gleichen Kurve ab, sind also auch in nächster Nähe des Umwandlungspunktes reversibel.

Aus dem Zusammenhange der beiden Kurven a und b, der später dargelegt wird, zu schliessen, ist ein solcher Verlauf der a-Kurve unwahrscheinlich. Es ist anzunehmen, dass a gleichfalls wie b weitersteigt und dass beide Kurven erst im Moment, wenn die Umwandlungstemperatur erreicht ist, auf kleine Werte abfallen.

Der Wert der anfänglichen Suszeptibilität a bei 358° C. wurde in den Fig. 5 und 12 nicht eingetragen, da er nicht wahrscheinlich ist; bei stetigem Weitersteigen der a-Kurve müsste dieser Wert ungefähr doppelt so gross sein, als er gefunden wurde.

Es kann möglich sein, dass das Sinken der anfänglichen Suszeptibilität in nächster Nähe des Umwandlungspunktes davon herrührt, dass ein Teil des Nickelringes schon die Umwandlungstemperatur hat, während der andere Teil noch etwas kälter ist. Kleine Temperatur-Unregelmässigkeiten und Schwankungen in einem so grossen Ofen sind immerhin unvermeidlich und haben natürlich in nächster Nähe des Umwandlungspunktes einen grossen Einfluss auf den Zustand des Nickels. Die Unstetigkeit im Anwachsen der k-Werte bei 358° C. dürfte auch diesem Umstande zuzuschreiben sein.

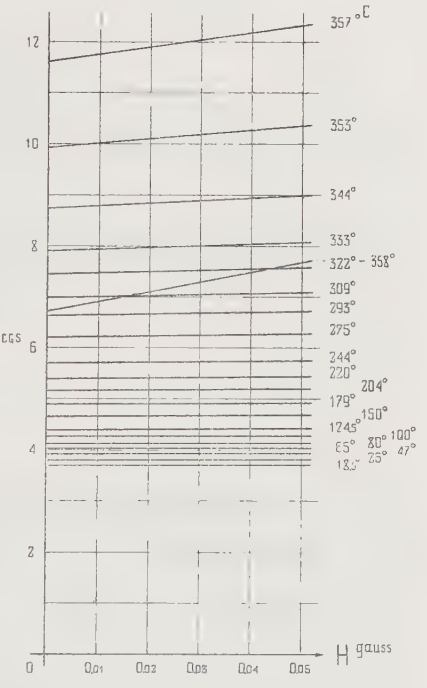


Fig. 4.
Die Suszeptibilität k in Funktion der Feldstärke H.

Zu vollkommen exakten Untersuchungen mit kleineren Temperatur-Intervallen in der Nähe des Umwandlungspunktes müsste ein flacher Ring gewählt werden, dessen Höhe im Verhältnis zur Ofenhöhe klein ist.

Um einen Zusammenhang der beiden Kurven zu finden, wurden die zu gleichen Temperaturen gehörenden Werte von a und b logarithmiert und die gefundenen Logarithmen in ein Koordinatensystem,

der eine Logarithmus als Abszisse, der andere als Ordinate, vereinigt. Die Verbindung der so aufgetragenen Punkte ergibt, wie aus Fig. 5 oben ersichtlich, eine Gerade von der Gleichung

$$\log a = \log A + x \log b,$$

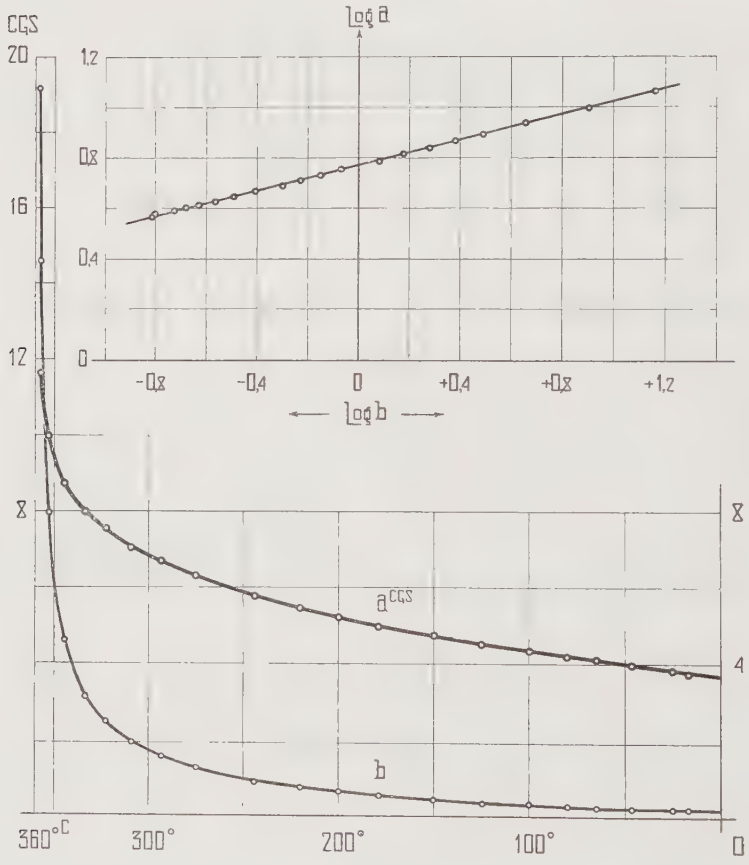


Fig. 5.

[Die anfängliche Suszeptibilität a und die anfängliche Neigung b der Suszeptibitätkurven $k = f(H)$ in Funktion der Temperatur. — Potentieller Zusammenhang der beiden Kurven.

in welcher $\log A$ die Anfangsordinate, die Ordinate des Schnittpunktes der Geraden mit der Achse $\log b = 0$, und x die Neigung der Geraden bedeuten.

Der obigen Gleichung entspricht nun

$$a = A\, b^x,$$

womit sich eine Potenz als Zusammenhang der anfänglichen Suszeptibilität a und der anfänglichen Neigung b zeigt.

Die Gerade schneidet die Achse $\log b = 0$ in der Ordinate

$$\log A = 0{,}772 \text{ (daraus } A = 5{,}9156)$$

und hat eine Neigung $x = \frac{1}{4.0}$.

Die Gleichung für a schreibt sich somit

$$a = 5{,}9156\, b^{1/4}$$

und zur vierten Potenz erhoben

$$a^4 = 5{,}9156^4 \cdot b,$$

also

$$b = \frac{a^4}{1225}. \qquad \text{(I)}$$

Die vorstehenden Untersuchungen ergaben demnach folgende Resultate:

Unterhalb der Umwandlungstemperatur wächst bei dem untersuchten Nickel mit steigender Temperatur die anfängliche Suszeptibilität und die anfängliche Neigung der Suszeptibilitätskurven in Funktion der Feldstärke.

Für jede Temperatur innerhalb des Versuchsbereiches ist die anfängliche Neigung der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ mit der vierten Potenz der anfänglichen Suszeptibilität proportional (I).

Als weiteres Resultat wurde für das untersuchte Nickel eine wesentlich tiefere Umwandlungstemperatur, als bei den bisher durchgeführten Versuchen im phys. Laboratorium der eidg. polytechnischen Schule mit Nickelsorten gleicher Provenienz konstatiert (S. 25 u. 32).

Da letztere aber in sehr starken Feldern von mehreren Tausend Gauss, die in vorliegender Arbeit beschriebenen jedoch in sehr schwachen Feldern bis 0,0043 Gauss vorgenommen wurden, so ist die Vermutung naheliegend, dass die Umwandlungstemperatur von der Feldstärke abhängig ist.

Um darüber Aufschluss zu erhalten, wurden die im zweiten Teil beschriebenen orientierenden Versuche ausgeführt.

B. ABHÄNGIGKEIT DES UMWANDLUNGSPUNKTES VON DER FELDSTÄRKE.

15. Einleitung: Definition des Umwandlungspunktes.

Wird für ein gegebenes Feld das Quadrat der Magnetisierungsintensität I^2 in Funktion der Temperatur T aufgetragen, os zeigt die so erhaltene Kurve in einem ausgedehnten Bereich vor dem Verlust der starken magnetischen Eigenschaften einen geradlinigen Verlauf.

Es wird aber beim Verlust der starken magnetischen Eigenschaften die Intensität der Magnetisierung nicht Null, sondern sehr klein. Der Körper nimmt paramagnetische Eigenschaften an. Als Umwandlungspunkt Θ wird nun der Schnittpunkt des bis zur t-Achse verlängerten geradlinigen Teiles der Kurve $I^2 = f(t)$ mit der t-Achse definiert (s. Fig. 9).

I. Versuchseinrichtung.

16. Methode[1]).

Aus dem zu untersuchenden Nickel wurde ein längliches Rotationsellipsoid[2]) (grosse Achse 7,5 mm, kleine Achse 2 mm) gedreht und, um eine seiner kleinen Achsen drehbar, in das horizontale Feld eines Elektromagneten gebracht, der sich um eine vertikale Achse drehen lässt. Die grosse Achse des Ellipsoides fällt somit in die horizontale Richtungsebene des magnetischen Feldes des Elektromagneten.

Die Methode besteht in der Messung des von dem horizontalen äusseren Felde H des Magneten auf das Ellipsoid ausgeübten Drehmomentes. Wenn N_1 und N_2 die Hauptmagnetisierungsfaktoren für die horizontalen Achsen Ox und Oy des Ellipsoides vom Volumen V sind, so ist das Drehmoment

$$C = V I H \sin(\alpha - \varphi),$$

wobei α der Winkel des Feldes H und φ derjenige der Intensität der Magnetisierung I mit Ox bedeuten. Da das resultierende Feld aus dem äusseren Felde des Magneten und dem entmagnetisierenden Felde des Ellipsoides die gleiche Richtung wie I hat, so kann für das Drehmoment gesetzt werden

$$C = V(N_2 - N_1) I^2 \sin\varphi \cos\varphi,$$

das für $\varphi = 45°$ durch ein Maximum geht:

$$C_{max} = \frac{1}{2} V(N_2 - N_1) I^2.$$

Das mit einer Feder gemessene Drehmoment C ist somit, bis auf einen konstanten Faktor, gleich dem Quadrate der Intensität der Magnetisierung.

Da die Untersuchungen auch in schwachen Feldern vorgenommen wurden, so sei schon jetzt bemerkt, dass diese Drehmomentmethode nur dann genau gilt, wenn das zu untersuchende Metall gesättigt ist;

[1]) P. Weiss: J. de phys. 1907, t. VI., 4e sér., p. 665. — P. Weiss: Phys. Zeitschrift 1908, 9. Jahrgang, S. 359.

[2]) Maxwell: Electricity, Vol. II, §§ 437—438. — Ewing: Induktion in Iron, Ch. I, p. 23.

denn nur dann tritt das Maximum des Drehmomentes bei $\varphi = 45°$ auf. Da die Sättigung in schwachen Feldern erst bei Temperaturen in der Nähe des Umwandlungspunktes eintritt, so sind die I^2- und I-Kurven (Fig. 9) nur im letzten, steil gegen den Umwandlungspunkt zu abfallenden Teil streng richtig[1]).

Immerhin geben sie ein angenähertes Bild des Verlaufes der Magnetisierungsintensität I in Funktion der Temperatur, was schon der Vergleich mit der I-Kurve für ein Feld $H = 4$ C. G. S. zeigt, die mit dem Nickelring nach der ballistischen Methode aufgenommen wurde (s. Fig. 9 rechts unten).

17. Erzeugung und Messung des magnetischen Feldes.

Das magnetische Feld wurde mittelst eines Elektromagneten[2]) erzeugt, dessen magnetischer Kreis durch ein U-förmiges Joch aus sehr weichem schwedischen Eisen, an dem zwei zylindrische Kerne p und p' (s. Fig. 7) aus gleichem Material befestigt sind, gebildet

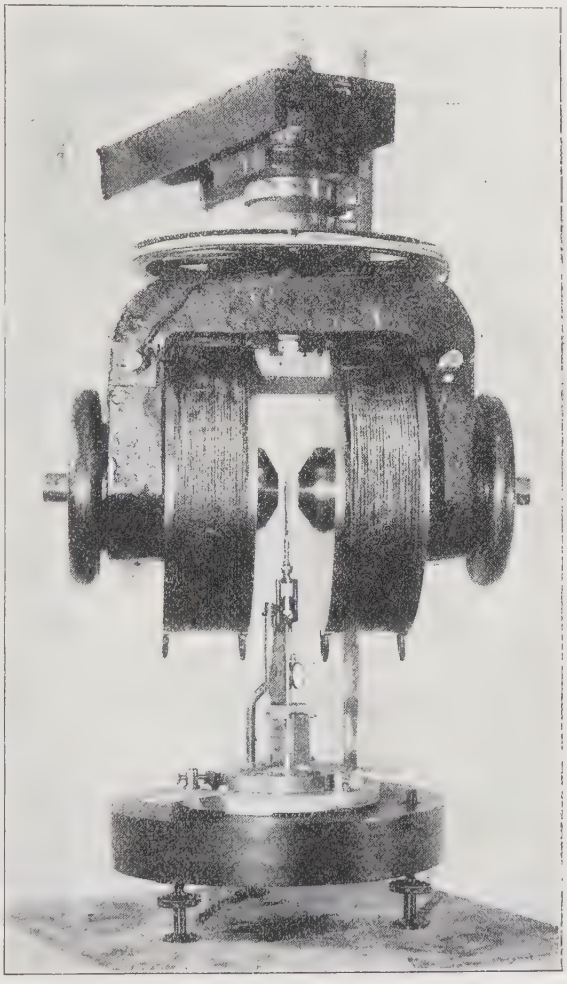


Fig. 6[3]).

Elektromagnet und Apparat zur Messung der Magnetisierungs-Intensität mit abgenommenem elektrischem Ofen.

[1]) F. Hegg: Thèse, Zurich 1910. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 191 t. XXVIII.

[2]) P. Weiss: Arch. des Scs. Phys. et Nat. 1908, t. XXVI, p. 105. — P. Weiss: J. de phys. 1907, t. VI., 4e sér., p. 353. — Ausführliche Zeichnungen und Abbildungen: Schweiz. Bauzeitung B. 53, 1909, S. 240.

[3]) Aus F. Hegg: Thèse, Zurich 1910.

wird. Die Kerne können mittelst Schraubenmuttern, die als Handrädchen m ausgebildet sind, in der Richtung ihrer Achse bewegt werden, wodurch eine genaue Einstellung des Luftspaltes ermöglicht

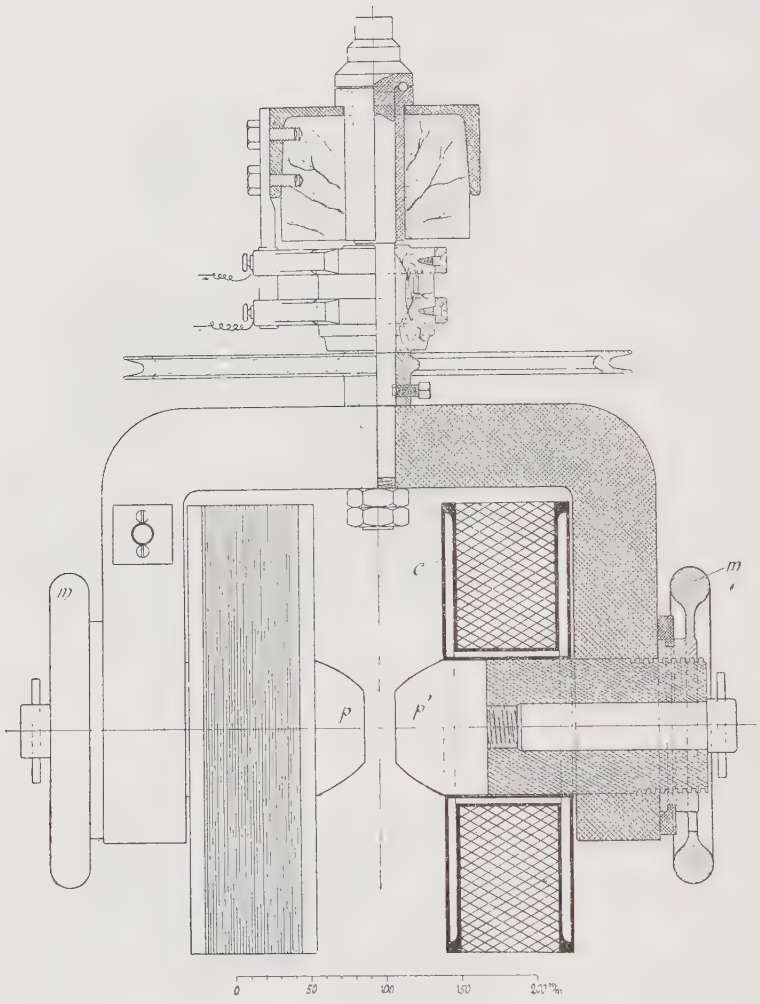


Fig. 7 [1]).

Querschnitt durch den Elektromagneten.

ist. Eine Gradeinteilung an den Handrädchen gibt die jeweilige Entfernung der Pole an. Zur Vermeidung einer zu grossen Streuung sind die Spulen so nahe als möglich an die Polstücke verlegt.

Der Apparat ist an einer Konsole drehbar aufgehängt und kann mittelst einer Schnur vom Platze des Beobachters aus gedreht werden.

[1]) Aus F. Hegg: Thèse, Zurich 1910.

Fig. 6 zeigt einen Magneten des physikalischen Institutes der eidg. polytechnischen Schule in Zürich; die Untersuchungen wurden mit einem kleineren, gleicher Konstruktion[1]) durchgeführt. In Fig. 7 ist ein Querschnitt durch den Magneten dargestellt.

Zur Bestimmung der Magnetisierungsintensität I ist eine genaue Kenntnis des magnetischen Feldes H in absoluten Einheiten unbedingt erforderlich. Solche Feldmessungen werden mittelst der elektromagnetischen Waage von Cotton[2]) vorgenommen.

Da es sich hier aber nur um die Bestimmung des Umwandlungspunktes und die relative Lage der Magnetisierungsintensitäten I zu einander handelte, wozu die Kenntnis von I in absoluten Einheiten nicht erforderlich war, so wurden die Feldstärken nicht direkt gemessen, sondern nach Angaben von A. Perrier benützt.

Es sei noch erwähnt, dass zur Erlangung des gleichen, einer bestimmten Stromstärke des Spulenstromes entsprechenden Feldes eine gänzliche Entmagnetisierung der Eisenkerne unbedingt erforderlich ist. Nur dadurch lässt sich für sehr kleine Felder eine Genauigkeit von 1 % erreichen, was als äusserste Genauigkeitsgrenze für Feldmessungen solch kleiner Werte angesehen werden kann.

Die Entmagnetisierung erfolgte durch Wechselstrom von 50 Perioden, dessen Intensität vermittelst Regulierwiderständen ganz langsam bis zu Bruchteilen von Ampère vermindert wurde.

Dadurch war die Möglichkeit gegeben, sämtliche Untersuchungen von den starken Feldern, wie sie die Sättigung erfordert, bis zu den ganz schwachen mit dem gleichen Apparat durchzuführen.

18. Apparat zur Messung der Magnetisierungs-Intensität[3]).

Der Apparat (s. Fig. 8), welcher das Ellipsoid trägt, ist um eine vertikale Achse drehbar, die mit der Drehachse des Elektromagneten zusammenfällt. Zwei feste, gegeneinanderschauende Stahlspitzen, p und p', um die sich der Apparat mittelst Saphirlagern dreht, fixieren die Achse im Raum.

Der drehbare Teil besteht in der Hauptsache aus einem auf der unteren Stahlspitze aufruhenden Kupferstab d, der am oberen Ende

[1]) A. Perrier: Thèse, Zurich 1909, p. 15.

[2]) Cotton: J. de phys. 1900, t. IX., 3e sér., p. 383. — Cotton: l'Eclairage électrique 1894, t. XXIV., p. 257. — Photograph. Abbildung: Weiss et Cotton: Le Radium 1907, p. 204.

[3]) F. G. Baily: Phil. Transactions 1896, t. CLXXXII., p. 715. — F. G. Baily: Electrician 1894, t. XXXIII, p. 516. — P. Weiss et V. Planer: J. de phys. 1908, t. VII, 4e sér., p. 5. — P. Weiss: J. de phys. 1905, t. IV, 4e sér., p. 835. — A. Perrier: Thèse, Zurich 1909, p. 17. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 1909, t. XXVII. — F. Hegg: Thèse, Zurich 1910, p. 15. — S. auch: Archives des Scs. Phys. et Nat. 1910, t. XXVIII.

zu einem Rahmen ausgebildet ist, um den Tragarm der zweiten Stahlspitze zu umgreifen. Der Rahmen trägt in einer Klemmvorrichtung ein Porzellanstäbchen mit dem Silbersupport zur Befestigung des zu untersuchenden Ellipsoides *E*. Am Kupferstab sind ferner noch befestigt ein konkaver Spiegel *m* für die Ablesung der Ablenkungen auf einer zwei Meter entfernten Skala und eine Dämpfvorrichtung aus Aluminium, deren Flügel in Petroleum tauchen[1]). Die dem Drehmoment des Ellipsoides entgegenwirkende Spiralfeder ist mit ihrem inneren Ende am drehbaren Teil des Apparates befestigt. Ihr äusseres Ende ist mit einem Ring verbunden, der nach Einstellung der gewünschten Nullage in einem zweiten unbeweglichen Ring festgeklemmt werden kann.

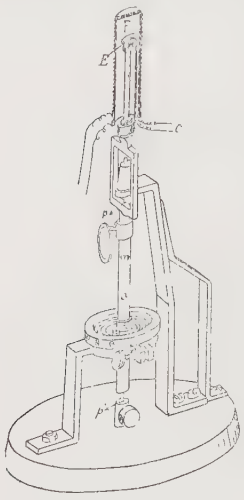


Fig. 8[2]).
Apparat zur Messung der Magnetisierungs-Intensität. (Elektr. Ofen im Querschnittt.)

Der ganze Apparat ist auf einer Messingplatte angeschraubt, die auf einem durch Schrauben horizontal einstellbaren Holzrondell ruht(s. Fig. 6).

Bei den Messungen in den schwachen Feldern war es nötig, den aus Kupfer bestehenden Rahmen durch einen wesentlich leichteren aus Holz zu ersetzen, um die Reibung in den Spitzen zu verkleinern.

19. Elektrischer Ofen.

Zur Verwendung kam ein Ofen *F* (s. Fig. 8), wie ihn A. Perrier und später auch F. Hegg[3]) in ihren magneto-thermischen Arbeiten mit Erfolg benützten. Derselbe besteht aus einem vertikalen, oben geschlossenen Zylinder aus 1 mm starkem Silberblech von 14 mm innerem Durchmesser und von ca. 80 mm Höhe. Als Material wurde deshalb Silber gewählt, weil es ein gegen Magnetismus indifferentes Metall ist, die Wärme gut leitet und sich nicht oxydiert. Über dem Zylinder wurde in einer Höhe von 75 mm blanker Platindraht für den Heizstrom bifilar gewickelt, dessen Spiralen vom Silbermantel durch eine Schicht Glimmer isoliert und von einander durch Kaolinpaste getrennt waren. Das Ganze wurde mit einer Mischung von Kaolin und Wasserglas in mehreren Schichten bestrichen.

[1]) Die Dämpfvorrichtung ist in Fig. 8 nicht angegeben. Siehe A. Perrier: Thèse, Zurich 1909, Fig. 2, p. 17.

[2]) Aus F. Hegg: Thèse, Zurich 1910.

[3]) Weiss et Beck: J. de phys. 1908, 4e sér., t. VII, p. 5. — A. Dumas: Thèse, Zurich 1908. — A. Perrier: Thèse, Zurich 1909. — F. Hegg: Thèse, Zurich 1910. — S. auch: P. Curie: Thèse, mars 1905, Gauthier Villars. — P. Curie: Oeuvres publ. par la Soc. franc. de Phys.

Die Aichung des Ofens wurde mit einem Thermoelement *C* (s. Fig. 8) auf ähnliche Weise vollzogen, wie im ersten Teil der Arbeit beschrieben, und diejenige Partie des Ofens gesucht, in der die Temperatur vollkommen konstant ist. In einem Abstande von 0,5 cm von der Decke des Ofens ergab sich ein Raum von 15 mm Höhe, in dem die Temperatur bei 600° C. nur um 0,5° variierte.

Der Ofen wurde dann so eingestellt, dass das Ellipsoid und die Lötstelle des Thermoelementes in diesen Raum zu liegen kamen.

20. Temperaturmesseinrichtung.

Die Temperaturmessungen erfolgten mit einem Thermoelement von Le Chatelier, dessen Drähte durch Hartglas von einander isoliert am Mantel des Ofens so befestigt wurden, dass die Lötstelle in nächster Nähe des Ellipsoides zu liegen kam.

P. Weiss bringt in neuester Zeit die Lötstelle direkt mit dem Ellipsoid in Berührung, wodurch absolute Gewissheit über die Temperatur des Körpers selbst erreicht wird. Die beiden Drähte, durch Quarzglasröhrchen isoliert und längs des Porzellanstäbchens nach abwärts aus dem Ofen geführt, machen dann die Drehungen des Apparates mit, während ihre freien Enden unbeweglich in zwei durch Eis gekühlte, mit Quecksilber gefüllte Glasnäpfe tauchen. Um bei der Drehung den hemmenden Einfluss auf das Moment möglichst klein zu halten sind die beiden Drähte zwischen den beweglichen Quarzglasröhrchen und den unbeweglichen Glasnäpfen in elastischen Spiralen gewunden.

Eine ähnliche Einrichtung wurde auch hier versucht, um die Lötstelle des Thermoelementes mit dem Ellipsoid in Berührung zu bringen. Doch musste dem hemmenden Einfluss der beiden Drähte auf das Drehmoment, der dort bei den Untersuchungen in sehr starken Feldern vernachlässigbar war, mehr Beachtung geschenkt werden, da es sich hier um bedeutend schwächere Momente handelte.

Die Drähte wurden am Rahmen des Apparates zur Messung der Magnetisierungs-Intensität nach abwärts und längs der Arme der Dämpfvorrichtung radial nach auswärts geleitet und tauchten mit ihren Enden beweglich in weite Quecksilbernäpfe. Bei der Bewegung der Drahtspitzen im Quecksilber zeigte sich jedoch eine so grosse Reibung, dass eine genaue Einstellung des Ausschlages nicht zu erreichen war. Es musste daher von dieser Einrichtung Abstand genommen und mit der am Ofen befestigten Lötstelle, wie eingangs beschrieben, die Umgebungstemperatur des Nickelellipsoides gemessen werden (s. Fig. 8). Dies ist auch vollkommen zulässig, wenn vom Anwärmen bis zur Messung genügend Zeit aufgewendet wird, um sicher zu sein, dass das Ellipsoid die Ofentemperatur angenommen hat.

Zur Messung der thermo-elektromotorischen Kraft des Thermoelementes diente ein Kompensationsapparat der „Land- und Seekabelgesellschaft, Nippes-Köln“ und ein Galvanometer Deprez-d'Arsonval zur Verwirklichung der Kompensation. Bei Anwendung der Nullpunktsmethode entfällt jeder Einfluss der Widerstandsänderung der Leiter vom Thermoelement zum Galvanometer.

Zur Aichung des Thermoelementes wurden genau bekannte Schmelz- und Siedepunkte benützt.

Die beiden Drähte wurden, durch Hartglasröhren von einander getrennt, mit der Lötstelle in ein weiteres, unten zugeschmolzenes Hartglasrohr gebracht und so in die Substanz, dessen Schmelzpunkt zu ermitteln war, eingetaucht. Der mit der Substanz gefüllte Chamottetigel wurde in einem Chamotteofen von Perrot gestellt und erhitzt. Bei Anwendung einer genügenden Menge der Schmelzmasse hält sich sowohl beim langsamen Erhitzen, als beim Erstarrenlassen die Temperatur des Schmelzpunktes ziemlich lange, was eine genaue Bestimmung der thermo-elektromotorischen Kraft erleichtert.

Die nachfolgenden Fixpunkte dienten zur Bestimmung der Aichungskurve und ergaben die thermo-elektromotorischen Kräfte:

Siede- bezw. Schmelzpunkt von		Thermo-elektromotorische Kraft	
Wasser	98° C.	$6{,}11 \times 10^{-4}$	Volt
Zinn	232° „	$16{,}69 \times 10^{-4}$	„
Blei	327° „	$25{,}16 \times 10^{-4}$	„
Zink	419° „	$33{,}80 \times 10^{-4}$	„
Antimon . . .	630° „	$54{,}87 \times 10^{-4}$	„

Die durch diese Punkte erhaltene Kurve wurde mit derjenigen von der technisch-physikalischen Reichsanstalt in Berlin für solche Thermoelemente gegebenen verglichen, um Interpolationen von Zwischenpunkten durch den Parallelismus der beiden Kurven zu erleichtern.

21. Empfindlichkeit und Genauigkeitsgrad.

Die Federn am Apparat zur Messung der Magnetisierungs-Intensität wurden so gewählt, dass die beobachteten Ablenkungen auf der Skala 100 bis 200 mm betrugen, was für die relativen Messungen, auf die es hier nur ankam, bei Zulassung eines Ablesungsfehlers von 0,1 mm, eine Genauigkeit von 1—2 ‰ ergibt. Da die Ablenkungen mit I^2 proportional sind, so sind für die I-Werte die relativen Fehler nur halb so gross.

Der Kompensationsapparat der Temperaturmesseinrichtung ist so konstruiert, dass noch Zehntelgrade mit einem Thermoelement von

Le Chatelier gemessen werden können. Diese Genauigkeit ist mehr als genügend, da die Temperatur des Ofens und des Ellipsoides nicht im selben Masse gleichförmig zu erhalten war.

Die magnetischen Feldstärken wurden, wie schon angedeutet, nicht gemessen, sondern nur nach Angaben von A. Perrier angenommen.

22. Allgemeine Disposition.

Die Skala zur Ablesung der Ablenkungen befand sich 2 m resp. 4 m von der Drehachse des Magneten entfernt. Mit einer Schnur konnte der Magnet vom Beobachtungsplatze aus, wo die nötigen Messinstrumente vereinigt waren, verdreht werden.

II. Versuchsdurchführung.

Der Ofen wurde angeheizt, die Temperatur mittelst des Thermoelementes und der Temperaturmesseinrichtung konstant gehalten, und nach Einstellung einer bestimmten Feldstärke die Ablenkungen, hervorgerufen durch das Drehmoment des äusseren magnetischen Feldes auf das Ellipsoid, gemessen. Bei ständigem Klopfen auf den Tisch des Apparates und bei langsamem Drehen des Elektromagneten liess sich leicht die der maximalen Ablenkung entsprechende Lage des Magneten einstellen.

Es wurden stets die Ablenkungen nach beiden Richtungen gemessen, um bei etwaiger Nachwirkung (Trägheit) der Feder die kleinen Verschiebungen des Nullpunktes zu eliminieren. Auch wurde stets der Spulenstrom des Magneten von jeder Ablesung des öftern kommutiert, um sicher zu sein, dass das Feld die der Stromstärke entsprechende Grösse angenommen hat.

Die Untersuchungen in starken Feldern bis zu $H = 250$ Gauss hinunter erfolgten mit dem kupfernen Rahmen und entsprechend starken Federn, die in schwachen Feldern mit dem Rahmen aus Holz und sehr schwachen Federn. Der Skalenabstand wurde für letztere auf ca. 4 m vergrössert, um noch genügende Genauigkeit zu erhalten.

Als Masstab für das Quadrat der Magnetisierungsintensität I^2 wurden die Ausschläge mit der Feder, die bei den Untersuchungen im Felde von 6500 Gauss gebraucht wurde, zugrunde gelegt (s. 1. und 2. Tabelle, Seite 44). Die Ablenkungen der andern Federn wurden auf den gleichen Masstab umgerechnet, indem die Ablenkungswinkel einer Feder bei gleicher Temperatur und den verschiedenen Feldstärken miteinander verglichen wurden (s. 3. bis 5. Tabelle, Seite 44).

Absolute Messungen wurden nicht vorgenommen; der Masstab für die Magnetisierungs-Intensitäten ist also mit Ausnahme der I-Kurve im Feld $H = 4$ Gauss (Fig. 9) ein willkürlicher.

Für die Feldstärke $H = 4$ Gauss erfolgte die Untersuchung mit dem Nickelring und der Messeinrichtung, wie sie im ersten Teil dieser Arbeit beschrieben ist; die Magnetisierungs-Intensität ergibt sich hier somit in absoluten Einheiten.

Die gefundenen Messungen sind in folgenden Tabellen zusammengestellt.

$H \sim 6500$ Gauss
Polabstand 20 mm

$t°$ C.	x mm $= I^2$	I willk. E.
50°	163,26	12,77$_7$
100	152,20	12,34$_0$
150	137,20	11,71$_4$
200	118,92	10,90$_5$
250	94,75	9,70$_5$
300	64,88	8,05$_4$
350	24,67	4,96$_7$
360	15,00	3,87$_3$
365	10,10	3,17$_8$
370	5,20	2,28$_0$
375	0,$_0$	—

$H \sim 3500$ Gauss
Polabstand 20 mm

$t°$ C.	x mm $= I^2$	I willk. E.
50°	163,26	12,77$_7$
100	152,20	12,34$_0$
150	137,20	11,71$_4$
200	118,92	10,90$_5$
250	94,20	9,70$_5$
300	64,21	8,01$_3$
350	21,50	4,63$_7$
360	11,00	3,31$_6$
365	6,00	2,44$_9$
370	0,80	0,89$_4$
371	0,$_0$	—

$H \sim 250$ Gauss; Polabstand 40 mm

$t°$ C.	x mm	$\sqrt{x}$	I^2	I willk. E.
280°	211,16	14,531	10,89	3,30$_0$
300	209,27	14,488	10,79	3,28$_5$
330	196,36	14,012	10,13	3,18$_3$
340	186,80	13,667	9,63$_8$	3,10$_4$
350	167,12	12,912	8,62	2,95$_6$
360	46,00	6,782	2,37	1,54$_0$
361	22,00	4,690	1,13$_5$	1,06$_5$
362	0,$_0$	—	—	—

$H \sim 50$ Gauss; Polabstand 40 mm

$t°$ C.	x mm	$\sqrt{x}$	I^2	I willk. E.
300°	65,58	8.098	0,355	0,59$_6$
330	68,81	8,295	0,373	0,61$_1$
340	70,30	8,384	0,381	0,61$_7$
350	71,78	8,472	0,389	0,62$_3$
355	71,03	8,428	0,385	0,62$_1$
357	67,40	8,210	0,365	0,60$_4$
360	29,75	5,454	0,161	0,40$_1$
360,5	0,$_0$	—	—	—

$H \sim 25$ Gauss; Polabstand 40 mm

$t°$ C.	x mm	$\sqrt{x}$	I^2	I willk. E.
310°	38,60	6,213	0,0834	0,28$_8$
330	40,06	6,329	0,0868	0,29$_4$
340	40,95	6,399	0,0887	0,29$_8$
350	42,01	6,481	0,0911	0,30$_1$
355	42,66	6,531	0,0924	0,30$_4$
357	43,12	6,566	0,0934	0,30$_5$
360	42,76	6,572	0,0927	0,30$_4$
> 360	0,$_0$	—	—	—

$H = 4$ Gauss; Ballistische Ringmethode

$t°$ C.	x mm	B C. G. S.	I C. G. S.
299°	239,55	1101,97	87,37
319,5	273,75	1259,30	99,89
336	225,27	1307,46	103,72
347	202,73	1182,34	93,76
352	179,48	1048,25	83,09
358,5	33,76	125,75	9,68
359,5	0,$_0$	—	—

Aus den Tabellen und aus der Fig. 9 ist zu ersehen, dass die Temperatur des Umwandlungspunktes mit abnehmendem Felde abnimmt. Es ergeben sich für die folgenden Feldstärken die nachfolgenden Temperaturen des Umwandlungspunktes:

H Gauss	Θ° C.	H Gauss	Θ° C.
6500	375,0	25	> 360,0
3500	371,0	4	359,5
250	362,0	0,0	359,0
50	360,5		

Die beiden letzten Werte sind dem ersten Teil der Arbeit entnommen.

III. Zusammenstellung und Diskussion der Resultate.

23. Die Magnetisierungs-Intensität in sehr starken Feldern.

Die Untersuchungen in den Feldern von 6500 und 3500 Gauss ergeben bis zu 200° C. die gleiche Magnetisierungs-Intensität; das Nickel ist somit in diesen Temperaturen schon bei 3500 Gauss vollkommen gesättigt. Von 200° C. an aufwärts zeigen sich Unterschiede in den Werten, indem bei gleicher Temperatur die Magnetisierungs-Intensität für 6500 Gauss grösser ist, als diejenige für 3500 Gauss. Bei 360° C. beträgt der Unterschied schon 30 %. Die Temperatur des Umwandlungspunktes wird von 371° C. bei $H = 3500$ Gauss auf 375° C. bei $H = 6500$ Gauss erhöht.

Daraus ist zu ersehen, dass der Einfluss von grösseren Feldstärken, als sie zur Sättigung notwendig sind, auf die Magnetisierungs-Intensität in den niederen Temperaturen ohne Belang

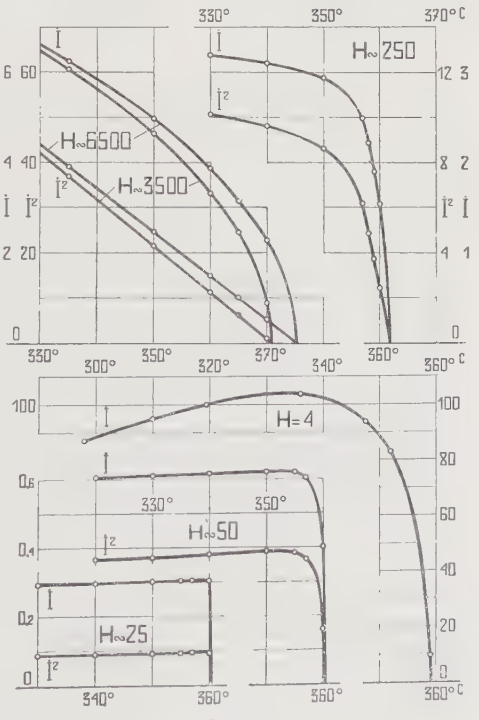


Fig. 9.

Die Magnetisierungs-Intensitäten I und ihre Quadrate in Funktion der Temperatur bei verschiedenen Feldstärken H in der Nähe des Umwandlungspunktes.

ist und sich erst bei Temperaturen in der Nähe des Umwandlungspunktes bemerkbar macht. Zugleich wird mit einer Zunahme des Feldes die Umwandlungstemperatur erhöht.

24. Die Magnetisierungs-Intensität für das äussere Feld $H = 0$.

Die von P. Weiss aufgestellte Theorie des „Molekularen Feldes und des Ferromagnetismus“ [1]) gibt den Zusammenhang der spontanen Magnetisierungs-Intensität und der Temperatur durch folgende Gleichungen:

$$\begin{cases} \dfrac{I}{I_0} = \dfrac{\mathrm{ch}\, a}{\mathrm{sh}\, a} - \dfrac{1}{a} \\ \dfrac{I}{\Theta} = \dfrac{3}{a}\dfrac{I}{I_0}, \end{cases}$$

worin I_0 den maximalen Wert der Magnetisierungs-Intensität [wenn alle Molekularmagnete parallel sind] und Θ die Temperatur des Verlustes des spontanen Ferromagnetismus bedeuten. Die Grösse a ist definiert durch

$$a = \frac{\mu H}{r T},$$ [2])

wo H das magnetische Feld, μ das magnetische Moment eines Elementarmagneten und $r T$ zweimal die kinetische Energie eines Freiheitsgrades des Molekels bei der absoluten Temperatur T bedeuten.

P. Weiss zeigt, dass in einem äusseren Feld $H = 0$ die Intensität der Magnetisierung einen endlichen, allein durch das molekulare Feld NI hervorgerufenen Wert annimmt, und dass diese Intensität der Magnetisierung nur der Sättigungsintensität bei der Beobachtungstemperatur T gleich sein kann. Um diese Sättigungsintensität in Funktion der Temperatur zu erhalten, muss in sehr starken Feldern gearbeitet werden, denn sonst ist die Intensität der Magnetisierung in allen Strukturelementen des untersuchten Körpers nicht parallel. Die dabei gefundene Temperatur des Umwandlungspunktes entspricht aber nicht der Temperatur beim Verluste des spontanen Ferromagnetismus für ein äusseres Feld $H = 0$, denn die vorliegenden Experimente zeigen, dass diese Umwandlungstemperatur mit abnehmendem äusseren Feld auch abnimmt.

Ist nun die Abhängigkeit der Temperatur des Umwandlungspunktes mit der Feldstärke bekannt, so kann die richtige Temperatur beim Verluste des spontanen Ferromagnetismus für ein äusseres Feld $H = 0$ gefunden werden und es handelt sich nur noch darum, den wahren Verlauf der Magnetisierungs-Intensität in Funktion der Temperatur in der Nähe des richtigen Umwandlungspunktes zu finden.

[1]) P. Weiss: loc. cit.

[2]) Langevin: Ann. Chim. Phys. 1905, t. V, 8e sér., p. 70. — S. auch W. Voigt: Ann. d. Physik 1902, 9, S. 115. — J. J. Thomson: Phil. Mag. 1903, t. VI., p. 673.

Diese einem äusseren Felde $H = 0$ entsprechende Kurve $I = f(t)$ wird sich mit den bisher als richtig angesehenen Kurven in den niederen Temperaturen decken und in den höheren Temperaturen von diesen lostrennen und die Temperaturachse früher, nämlich im wahren Umwandlungspunkte schneiden.

25. Abhängigkeit der Umwandlungstemperatur von der Feldstärke.

In Fig. 10 unten sind die Temperaturen der Umwandlungspunkte in Funktion des Feldes aufgetragen. Nach Mitteilung von P. Weiss zeigt sich empirisch ein parabolischer Zusammenhang, der aus dem Bilde rechts oben, wo die Temperaturen in Funktion von $\sqrt{H}$ aufge-

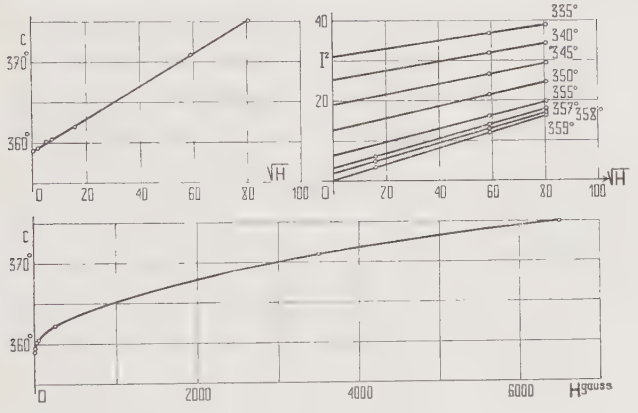


Fig. 10.

Parabolischer Zusammenhang der Umwandlungstemperatur Θ mit dem magnetischen Felde H (unten und links oben). — Ermittlung der Magnetisierungs-Intensitäten I für ein äusseres Feld $H = 0$ bei verschiedenen Temperaturen in der Nähe des Umwandlungspunktes (r. oben).

tragen sind, deutlich zu erkennen ist. Der Schnitt der Geraden mit der Achse $\sqrt{H} = 0$ gibt bei 359° C. den Scheitel der Parabel und die Temperatur des Umwandlungspunktes für ein äusseres Feld $H = 0$.

Die Temperatur Θ° C. des Umwandlungspunktes ist somit direkt proportional mit der Quadratwurzel aus der Feldstärke $\sqrt{H}$; der Zusammenhang ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$\Theta^\circ \text{ C.} = 359^\circ + 0{,}1984\sqrt{H}. \qquad \text{(II)}$$

0,1984 ist zugleich die Tangente des Neigungswinkels der Geraden $\Theta = f(\sqrt{H})$ (Fig. 10 links oben).

26. Konstruktion der Kurve $I = f(t)$ für ein äusseres Feld $H = 0$.

Für die Konstruktion des wahren Verlaufes der Sättigungs-Intensitätskurve konnten Angaben von P. Weiss benützt werden, der

in seinen noch nicht veröffentlichten Untersuchungen einen empirischen Zusammenhang zwischen I und H fand, darin bestehend, dass für konstante Temperaturen in Nähe des Umwandlungspunktes das Quadrat der Magnetisierungs-Intensität I^2 proportional mit der Quadratwurzel aus der Feldstärke $\sqrt{H}$ zunimmt.

Die zu bestimmten Temperaturen gehörenden Werte der verschiedenen I^2-Kurven sind nun in Funktion von $\sqrt{H}$ aufgetragen. Die Verbindungen der so erhaltenen Punkte geben infolge der Pro-

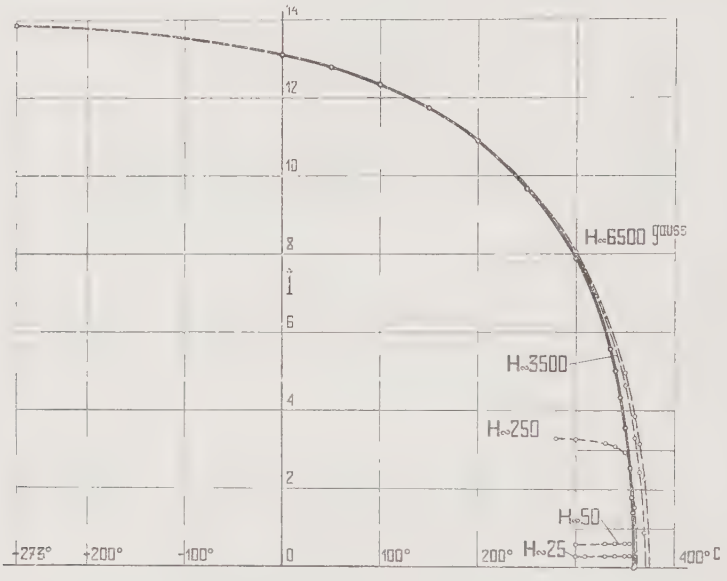


Fig. 11.

Die Magnetisierungs-Intensität I für ein äusseres magnetisches Feld $H = 0$ in Funktion der Temperatur. (Wahrer Verlauf der Sättigungs-Intensitätskurve).

portionalität Gerade, deren Schnittpunkt mit der Achse $\sqrt{H} = 0$ die I^2-Werte für das Feld $H = 0$ geben (Fig. 10 rechts oben).

Für die Umwandlungstemperatur $t = 359°$ geht diese Gerade durch Null, wodurch die Temperatur beim Verlust des spontanen Ferromagnetismus für das äussere Feld $H = 0$ wiedergefunden wird.

Da die Kurven der Magnetisierungs-Intensitäten in Funktion der Temperatur in nächster Nähe des Umwandlungspunktes angenähert einen parabolischen Verlauf haben, die I^2-Kurven somit geradlinig sind, so erstreckt sich die Proportionalität von I^2 und $\sqrt{H}$ zunächst auf das Bereich der geradlinigen Stücke der I^2-Kurven.[1]) Diese geradlinigen Teile zeigen einen nach aufwärts nur schwach konver-

[1]) Es kommen nur starke Felder in Betracht, da nur bei diesen der geradlinige Teil genügend lang ist, um benützt werden zu können.

gierenden Verlauf. Die beiden Tatsachen haben somit mit genügender Genauigkeit nebeneinander Berechtigung: Die Proportionalität von I^2 und $\sqrt{H}$ für verschiedene Temperaturen in Nähe des Umwandlungspunktes und der Zusammenhang der Temperatur Θ des Umwandlungspunktes mit der Quadratwurzel aus der Feldstärke $\sqrt{H}$.

Aus den in Fig. 10 rechts oben durch Extrapolation gefundenen I^2-Werten lassen sich nun die Magnetisierungs-Intensitäten I für ein äusseres Feld $H = 0$ berechnen; sie geben in Funktion von der Temperatur aufgetragen den wahren Verlauf der Magnetisierungs-Intensität für ein äusseres Feld $H = 0$ (Fig. 11).

Nachfolgend eine Zusammenstellung der Werte aus Fig. 10 rechts oben:

$t°$ C.	H C.G.S. = 6500	3500	250	0	
	I^2	I^2	I^2	I_0^2	I_0
335°	39,0	36,8	—	31,0	$5{,}56_7$
340	34,4	32,0	—	25,25	$5{,}02_7$
345	29,4	26,6	—	19,0	$4{,}35_8$
350	24,67	21,5	—	12,66	$3{,}55_8$
355	19,8	16,2	—	6,4	$2{,}54_8$
357	18,0	14,1	6,2	3,25	$1{,}80_2$
358	17,1	13,0	4,9	2,0	$1{,}41_5$
359	16,2	12,0	3,56	0,0	0,0

27. Zusammenhang der Grössen a und b mit der Magnetisierungs-Intensität I.

Die im ersten Teil der Arbeit gefundenen Werte der anfänglichen Suszeptibilität a und der anfänglichen Neigung b der einzelnen Suszeptibilitätskurven wurden in Funktion der für ein äusseres Feld $H = 0$ gefundenen Magnetisierungs-Intensität I[1]) aufgetragen. Der Zusammenhang ist aus Fig. 12 ersichtlich und gibt eine einfache Beziehung zwischen der anfänglichen Neigung b und der Magnetisierungs-Intensität I in Form einer gleichseitigen Hyperbel. Die vertikale Achse der Hyperbel fällt mit der Achse $I = 0$ zusammen, die horizontale liegt 2,18 Einheiten unter der Achse $b = 0$. Ihre Lage wird durch den Schnittpunkt der Geraden b_r, welche die Werte b in Funktion der reziproken Werte der Magnetisierungs-Intensität $\frac{1}{I}$ darstellt, mit der Achse $I = 0$ gefunden. Diese Gerade zeigt zugleich den

[1]) I in willkürlichen Einheiten.

hyperbolischen Zusammenhang zwischen b und I, welcher durch folgende Gleichung ausgedrückt wird

$$(b + 2{,}18)\, I^{1}) = 30{,}214. \qquad \text{(III)}$$

Daraus folgt

$$b = 30{,}214\, \frac{1}{I} - 2{,}18. \qquad \text{(III a)}$$

30,214 gibt zugleich die Tangente des Neigungswinkels der Geraden b_r an.

Die Gerade b_r schneidet die Achse $b = 0$ in der Abszisse $\frac{1}{I} = 0{,}07215$; die anfängliche Neigung b wird somit bei der Magnetisierungs-Inten-

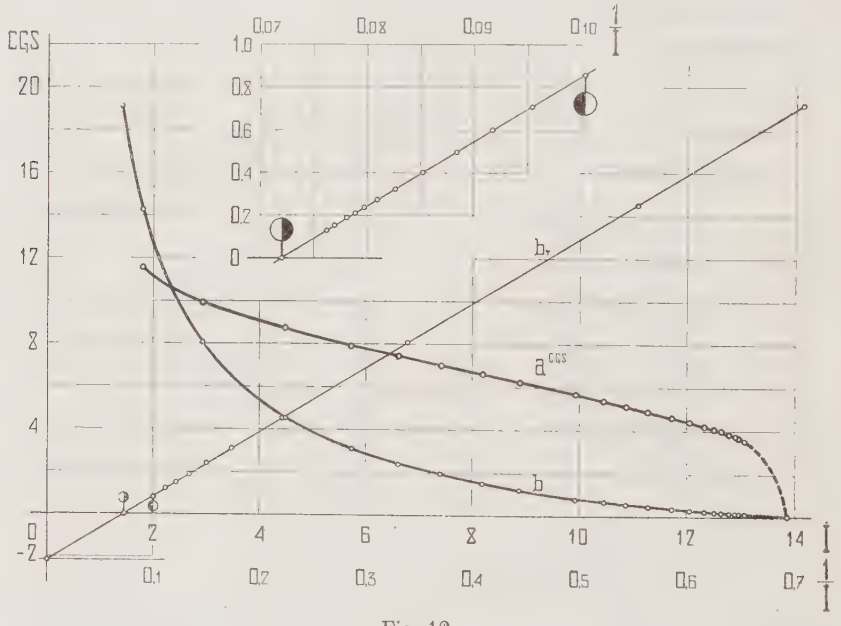


Fig. 12.

Die anfängliche Suszeptibilität a und die anfängliche Neigung b der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ in Funktion der Magnetisierungs-Intensität I. — Hyperbolischer Zusammenhang der anfänglichen Neigung b mit der Magnetisierungs-Intensität I.

sität $I = 13{,}860$[1]) Null. Da die anfängliche Suszeptibilität a mit b durch die Gleichung

$$b = \frac{a^4}{1225} \qquad \text{(I)}$$

zusammenhängt, so wird auch a bei der gleichen Magnetisierungs-Intensität $I = 13{,}860$ Null.

Es ist naheliegend, 13,860 als die Magnetisierungs-Intensität im absoluten Nullpunkt anzusehen. In Fig. 11 ist auch dieser Wert bei — 273° C. eingetragen; er gibt einen stetigen Verlauf der Kurve $I = f(t)$.

[1]) I in willkürlichen Einheiten.

Folgende Angabe aus den Untersuchungen von P. Weiss und Kamerlingh Onnes[1]) mit chemisch-reinem Nickel in sehr tiefen Temperaturen konnte noch zum Vergleich herangezogen werden. Beide Forscher fanden für die Magnetisierungs-Intensitäten bei 17° C. und 20° absolut ein Verhältnis

$$\frac{I_{17° \text{ C.}}}{I_{20° \text{ abs.}}} = \frac{1}{1{,}0548}.$$

Die entsprechenden Werte aus der in Fig. 11 dargestellten Kurve $I = f(t)$ geben ein Verhältnis

$$\frac{I_{17° \text{ C.}}}{I_{20° \text{ abs.}}} = \frac{1}{1{,}0634},$$

welches bis auf 8,1 ‰ mit dem von P. Weiss und Kamerlingh Onnes angegebenen übereinstimmt. In Anbetracht der Verschiedenheit der untersuchten Nickel und der angewandten Methoden kann die Übereinstimmung als genügend bezeichnet werden.

$I_0 = 13{,}860$ entspricht somit wirklich der Magnetisierungs-Intensität für den absoluten Nullpunkt, bei welcher die anfängliche Neigung b der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ und die anfängliche Suszeptibilität a Null werden.

Beide Werte wachsen mit abnehmender Intensität der Magnetisierung und zeigen einen ähnlichen Verlauf wie in Fig. 5. Die auf Seite 32 erwähnte Unstetigkeit der anfänglichen Suszeptibilität a bei 358° tritt auch hier bei der dieser Temperatur entsprechenden Magnetisierungs-Intensität $I = 1{,}415$ auf. Infolge des dort erwähnten Zusammenhanges der anfänglichen Suszeptibilität a mit der anfänglichen Neigung b der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ wird a gleichfalls wie b weitersteigen und beide Kurven werden erst im Moment, wenn der Umwandlungspunkt ($I = 0$) erreicht ist, auf kleine Werte abfallen.

Die Resultate des ersten Teils dieser Arbeit sind auf Seite 35 angegeben und auf Seite 49 wieder erwähnt.

Die im zweiten Teil beschriebenen Untersuchungen führten zu nachstehenden Resultaten:

Die Verschiebung der Umwandlungstemperatur des untersuchten Nickels ist proportional der Quadratwurzel aus der Feldstärke (II).

Sowohl die anfängliche Suszeptibilität als auch die anfängliche Neigung der Suszeptibilitätskurven in Funktion der Feldstärke werden erst im absoluten Nullpunkt gleich Null.

[1]) Acad. Amsterdam, Febr. 1910.

Die anfängliche Neigung der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ ist bis auf eine durch den vorhergehenden Satz bestimmte subtraktive Konstante proportional mit dem reziproken Werte der Magnetisierungs-Intensität (III).

Der Zusammenhang der anfänglichen Suszeptibilität mit der Magnetisierungs-Intensität ergibt sich aus der im ersten Teil angegebenen einfachen Beziehung der anfänglichen Suszeptibilität zu der anfänglichen Neigung der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ und der

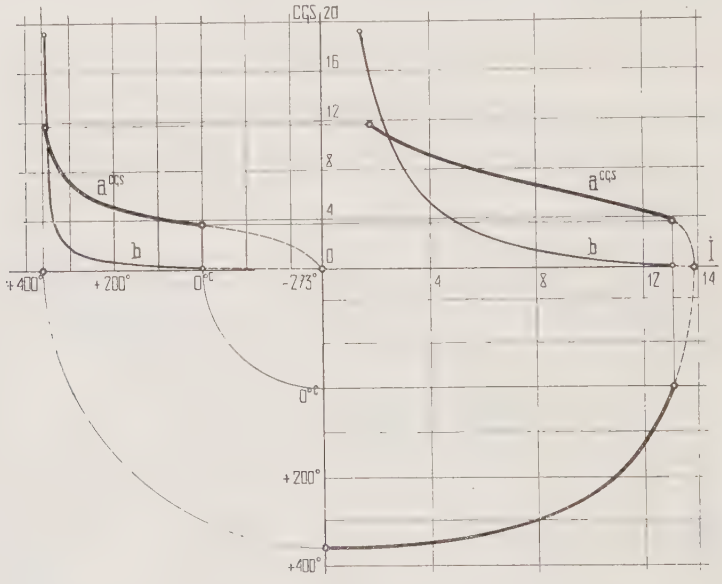


Fig. 13.

Zusammenhang der anfänglichen Suszeptibilität a und der anfänglichen Neigung b der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$ mit der Temperatur t und der Magnetisierungs-Intensität I.

letzteren zur Magnetisierungs-Intensität; er findet seinen Ausdruck in der Gleichung

$$a = \sqrt[4]{1225 \times 2{,}18} \sqrt[4]{\frac{I_0}{I} - 1}, \qquad \text{(IV)}$$

worin 1225 die Konstante aus der Gleichung (I) (Seite 35), 2,18 die Konstante aus der Gleichung (III) (Seite 50) und I_0 die Magnetisierungs-Intensität für den absoluten Nullpunkt bedeuten.

Es ist somit

$$a = 7{,}188 \sqrt[4]{\frac{I_0}{I} - 1}. \qquad \text{(IV a)}$$

Einen übersichtlichen Zusammenhang der anfänglichen Suszeptibilität, der Neigung der Suszeptibilitätskurven $k = f(H)$, der Magnetisierungs-Intensität und der Temperatur zeigt noch die Schlussfigur 13.

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Einleitung 5

A. Die anfängliche Suszeptibilität von Nickel in Abhängigkeit von der Temperatur 8

I. Versuchsmittel 8

1. Methode 8

2. Vorversuche zur Ermittlung der Ringgrösse 10

3. Ringbewicklung 11

4. Elektrischer Ofen 13

5. Temperaturmesseinrichtung 16

6. Elektro-magnetische Messeinrichtung 18

7. Empfindlichkeit und Genauigkeitsgrad 21

8. Allgemeine Disposition 22

II. Versuchsdurchführung 22

9. Unregelmässigkeiten zu Beginn der Versuche 23

10. Umkehrbarkeit der Suszeptibilität 24

11. Eigentliche Versuchsdurchführung 24

12. Tabellen 25

13. Verlauf der Suszeptibilitäts-Kurven 28

14. Umwandlungspunkt 31

III. Zusammenstellung und Diskussion der Resultate 32

B. Abhängigkeit des Umwandlungspunktes von der Feldstärke 35

15. Definition des Umwandlungspunktes 35

I. Versuchseinrichtung 36

16. Methode 36

17. Erzeugung und Messung des magnetischen Feldes . . . 37

18. Apparat zur Messung der Magnetisierungs-Intensität . . . 39

19. Elektrischer Ofen 40

20. Temperaturmesseinrichtung 41

21. Empfindlichkeit und Genauigkeitsgrad 42

22. Allgemeine Disposition 43

II. Versuchsdurchführung 43

III. Zusammenstellung und Diskussion der Resultate 45

23. Die Magnetisierungs-Intensität in sehr starken Feldern . . 45

24. Die Magnetisierungs-Intensität für das äussere Feld $H = 0$. 46

25. Abhängigkeit des Umwandlungspunktes von der Feldstärke . 47

26. Konstruktion der Kurve $I = f(t)$ für ein äusseres Feld $H = 0$ 47

27. Zusammenhang der Grössen a und b mit der Magnetisierungs-Intensität I 49

Lebenslauf.

Ich bin als Sohn des Ingenieurs Andreas Radovanović und dessen Ehefrau Julia am 18. Oktober 1884 in Lieben bei Prag geboren, besuchte die deutsche Volksschule in Pilsen und trat mit dem 11. Jahr in die dortige k. k. deutsche Staats-Oberrealschule ein, an welcher ich die ersten vier Klassen frequentierte. Vom Jahre 1899—1902 absolvierte ich die Industrieschule der Kantonsschule in Zürich und bestand im Herbst 1902 die Maturitätsprüfung. Zur Ausbildung in der französischen Sprache ging ich auf ein Jahr nach Neuchâtel, wo ich mich an der Académie als ordentlicher Hörer der Faculté des Sciences neben dem „Seminaire français" mit naturwissenschaftlichen und mathematischen Studien befasste.

Nach einer vierwöchentlichen Studienreise durch England trat ich im Herbst 1903 als regulärer Studierender in die mechanisch-technische Abteilung der eidgenössischen polytechnischen Schule in Zürich ein und erhielt im Jahre 1908 auf Grund einer Arbeit bei Herrn Prof. Dr. A. Stodola das Diplom als Maschineningenieur. Im Jahre 1905 unterbrach ich für ein halbes Jahr meine Studien, um in den Werkstätten der Maschinenfabrik Escher Wyss & Co. in Zürich praktisch tätig zu sein. Seit 1903 Schweizerbürger, absolvierte ich während der Ferien die verschiedenen Militärschulen und wurde im Jahre 1907 zum Leutenant der eidgenössischen Feldartillerie brevetiert. Vom September 1908 bis im Frühling 1910 führte ich vorstehende Arbeit im physikalischen Laboratorium der eidg. polytechnischen Schule bei Herrn Prof. Dr. P. Weiss aus.